

UNIVERZITA KARLOVA V PRAZE

Přírodovědecká fakulta

Katedra aplikované geoinformatiky a kartografie



**ANALÝZA METOD DPZ PRO DETEKCI KŘEMÍKOVÉ A
VÁPŇÍKOVÉ SLOŽKY V HORNINÁCH**

**ANALYSES OF REMOTE SENSING TECHNIQUES FOR DETECTING
QUARTZ AND CALCITE IN ROCK**

Diplomová práce

Lucie Šourková

srpen 2009

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Eva Štefanová, Ph.D.

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracovala samostatně a že jsem všechny použité prameny řádně citovala.

Jsem si vědoma toho, že případné použití výsledků, získaných v této práci, mimo Univerzitu Karlovu v Praze je možné pouze po písemném souhlasu této univerzity.

Svoluji k zapůjčení této práce pro studijní účely a souhlasím s tím, aby byla řádně vedena v evidenci vypůjčovatelů.

V Kolíně dne 27. srpna 2009

.....
Lucie Šourková

Děkuji vedoucí práce Ing. Evě Štefanové, PhD. za cenné rady a připomínky.

Děkuji Mgr. Veronice Kopačkové z České geologické služby za poskytnutá data a za pomoc při zpracování práce.

Analýza metod DPZ pro detekci křemíkové a vápníkové složky v horninách

Abstrakt

Dálkový průzkum Země v geologii je „rychlou a nenákladnou“ metodou pro počáteční stádia geologického výzkumu před započítím detailní terénní etapy. Zejména v aridních oblastech poskytuje DPZ jedinečný nástroj k mapování geologické stavby. Cílem této práce je analýza metod DPZ používaných pro detekci křemíkové a vápníkové složky v horninách. Metody byly testovány na snímcích ze skenerů Aster a Landsat ETM+ v zájmovém území Sečurské pouště v severozápadním Peru. Pro řešení otázky detekce minerálů se ukázala jako vhodnější data Aster. Data byla před použitím metod mapování předzpracována. Z typů atmosférických korekcí byla vybrána metoda *Empirical Line Calibration*. Nejlepšími metodami pro mapování, z jejichž výsledků se daly dobře identifikovat silikáty a vápence, byly mineralogická kombinace pásem ETM+ 5/7 – 5/4 – 3/1, kombinace pásem Aster 13/10 – 13/14 – 12/13, analýza hlavních komponent a klasifikace algoritmem *Spectral Angle Mapper*. Na základě dosažených výsledků byl navržen metodický postup pro tuto tematiku od předzpracování dat až ke klasifikaci.

Klíčová slova: dálkový průzkum Země, mapování minerálních složek, metody předzpracování a zpracování obrazu

Analyses of remote sensing techniques for detecting quartz and calcite in rock

Abstract

Remote sensing technique in geology is relatively fast and low cost procedure for initial research method preceding a more detailed field campaign. Remote sensing offer an excellent method of mapping surface geology mainly in arid regions. The analysis of remote sensing methods for silicon and calcium detection is the aims this thesis. The method were tested on satellite sensors Aster and Landsat ETM+ in Sechura desert region in northwest of Peru. For solution to mineral detection was the Aster data the most suitable. The data was preprocessed. From the atmospheric correction method was chosen the Empirical Line Calibration. The best methods for good identification of silicate and calcite were: mineralogic combination 5/7-5/4-3/1 ETM+ bands, color composite ratio bands Aster 13/10-13/14-12/13, Principal Component Analyses and classification Spectral Angle Mapper. On the strength of results was suggested metodical procedure including steps from preprocessing to classification.

Keywords: remote sensing technique, mineral components mapping, data preprocessing, digital image processing

OBSAH

PŘEHLED POUŽITÝCH ZKRATEK	6
SEZNAM OBRÁZKŮ	7
1 ÚVOD.....	9
2 CÍLE PRÁCE	11
3 LITERÁRNÍ REŠERŠE.....	13
3.1 Předzpracování dat.....	13
3.2 Zpracování obrazu	13
3.3 Spektrální projevy minerálů a hornin.....	14
3.4 Metody mapování silikátů a vápenců.....	14
4 SPEKTRÁLNÍ VLASTNOSTI MINERÁLŮ A HORNIN.....	16
4.1 Spektrální vlastnosti silikátů	17
4.2 Spektrální vlastnosti vápenců.....	18
5 METODY PRO MAPOVÁNÍ OBSAHU SILIKÁTŮ A KALCITŮ V HORNINÁCH...	20
5.1 Barevná syntéza	20
5.2 Poměr pásem	21
5.3 Analýza hlavních komponent.....	22
5.4 Dekorelační roztážení	23
5.5 Klasifikace	24
6 POUŽITÁ DATA	27
6.1 LANDSAT 7 ETM+	27
6.2 ASTER.....	29
7 POPIS OBLASTI	32
8 PŘEDZPRACOVÁNÍ DAT	34
8.1 Geometrické korekce	34
8.2 Mozaikování	35
8.3 Radiometrické korekce	35
9 VÝSLEDKY	37
9.1 Předzpracování	37
9.2 Výběr pásem	39
9.3 Barevná syntéza	40
9.4 Poměr pásem	42
9.5 PCA.....	46
9.6 Dekorelační roztážení	50
9.7 Klasifikace	51
9.8 Analýza výsledků.....	55
10 DISKUSE	56
10.1 Vhodnost družicových dat	56
10.2 Možnosti zpracování.....	56
11 ZÁVĚR.....	59
12 POUŽITÁ LITERATURA	62

PŘEHLED POUŽITÝCH ZKRATEK

ASTER	Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer
DCS	Decorrelation Stretching
DOS	Dark Object Subtraction
ELC	Empirical Line Calibration
ENVI	Environment for Visualizing Images
ETM+	Enhanced Thematic Mapper Plus
FFC	Flat Field Calibration
IARR	Internal Average Relative Reflectance
ISAC	In-Scene Atmospheric Compensation
LR	Log Residuals
NIR	Near Infra-Red
PCA	Principal Component Analysis
SAM	Spectral Angle Mapper
SFF	Spectral Feature Fitting
SRTM	Shuttle Radar Topographic Mission
SWIR	Short Wave Infra-Red
TIR	Thermal Infra-Red
USGS	United States Geological Survey
UV	Ultraviolet
VIS	Visible
VNIR	Visible and Near Infra-Red

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1: Absorpční pásy vybraných minerálů	16
Obr. 2: Porovnání vyzařování černého tělesa a křemene při 600K.....	17
Obr. 3: Posun minima a maxima vyzařování způsobené typem vazby Si-O	18
Obr. 4: Posun minima vyzařování podle obsahu SiO ₂	18
Obr. 5: Absorpční pásy vápence a dolomitu v NIR	19
Obr. 6: Absorpční pás vápenců v TIR.....	19
Obr. 7: Spektrální křivka křemene s vyznačením pásem ASTERU.....	21
Obr. 8: Postup tvorby PCA	23
Obr. 9: Postup DCS.....	24
Obr. 10: Princip Spectral Angle Mapper.....	25
Obr. 11: Spektrum s kontinuem a po odstranění kontinua	26
Obr. 12: Porovnání spektrálních pásem Landsat 7 ETM+ a ASTER.....	27
Obr. 13: Mapa Peru s vyznačeným zájmovým územím.....	28
Obr. 14: Snímek zájmového území Landsat 7 ETM+ barevná syntéza 3-2-1	29
Obr. 15: Mozaika ASTER.....	37
Obr. 16: Mozaika ETM+.....	37
Obr. 17: Porovnání spektrálních křivek po atmosférické korekci.....	38
Obr. 18: Spektrální křivka silikátů v porovnání s družicovými daty	39
Obr. 19: Spektrální křivka vápenců v VNIR a SWIR v porovnání s družicovými daty	40
Obr. 20: Spektrální křivka vápenců v TIR v porovnání s družicovými daty	40
Obr. 21: ASTER barevná syntéza 13-12-10 - identifikace silikátů.....	41
Obr. 22: ETM+ barevná syntéza 6-7-5 - identifikace silikátů.....	41
Obr. 23: ASTER barevná syntéza 8-7-9 - identifikace vápenců	41
Obr. 24: ASTER barevná syntéza 8-9-14 - identifikace vápenců	41
Obr. 25: ETM+ barevná syntéza 7-6-5 identifikace vápenců	42
Obr. 26: ASTER poměr pásem 13/10 - identifikace silikátů	43
Obr. 27: ASTER poměr pásem 12/13 - identifikace silikátů	43
Obr. 28: ETM+ poměr pásem 5/6 – identifikace silikátů.....	43
Obr. 29: ASTER poměr pásem 13/14 – identifikace vápenců	44
Obr. 30: ETM+ poměr pásem 5/7 – identifikace vápenců	44
Obr. 31: ASTER metoda RBD (7+9)/8 – identifikace vápenců.....	44
Obr. 32: ASTER metoda RBD (6+8)/7 – identifikace vápenců.....	44
Obr. 33: ETM+ metoda RBD (5+6)/7 – identifikace vápenců.....	45
Obr. 34: ASTER barevná syntéza poměrů 13/10-13/14-12/13 – identifikace silikátů.....	45
Obr. 35: ASTER barevná syntéza poměrů 13/10-12/11-13/14 – identifikace silikátů.....	45
Obr. 36: ETM+ barevná syntéza poměrů 5/7-5/4-3/1 – identifikace silikátů	46
Obr. 37: ETM+ barevná syntéza poměrů 5/7-5/4-3/1 – identifikace vápenců.....	46
Obr. 38: ASTER 3. komponenta – identifikace silikátů	47
Obr. 39: ASTER barevná syntéza PCA1-PCA2-PCA3 – identifikace silikátů.....	47
Obr. 40: ETM+ barevná syntéza PCA1-PCA2-PCA3 – identifikace silikátů.....	48
Obr. 41: ASTER barevná syntéza PCA1-PCA2-PCA3 - identifikace vápenců.....	49
Obr. 42: ETM+ barevná syntéza PCA1-PCA2-PCA3 – identifikace vápenců	49
Obr. 43: ASTER DCS 13-12-10 – identifikace silikátů.....	50
Obr. 44: ASTER DCS 14-12-10 – identifikace silikátů.....	50
Obr. 45: ETM+ DCS 6-7-5 – identifikace silikátů.....	50
Obr. 46: ETM+ DCS 7-6-5 – identifikace vápenců	51
Obr. 47: ASTER klasifikace ISODATA – identifikace silikátů	51
Obr. 48: ETM+ klasifikace ISODATA – identifikace silikátů	51
Obr. 49: ASTER klasifikace ISODATA – identifikace vápenců.....	52
Obr. 50: ETM+ klasifikace ISODATA – identifikace vápenců.....	52
Obr. 51: ASTER klasifikace SAM – identifikace silikátů	52

Obr. 52: ETM+ klasifikace SAM – identifikace silikátů	52
Obr. 53: ASTER klasifikace SAM – identifikace vápenců.....	53
Obr. 54: ETM+ klasifikace SAM – identifikace vápenců.....	53
Obr. 55: Zpracování výsledků klasifikace SFF	53
Obr. 56: ASTER klasifikace SFF RMS obraz – identifikace silikátů	54
Obr. 57: ASTER klasifikace SFF Fit obraz – identifikace silikátů	54
Obr. 58: Klasifikace vymezením oblasti do grafu.....	54
Obr. 59: ASTER klasifikace SFF RMS obraz – identifikace vápenců	54
Obr. 60: ASTER klasifikace SFF Fit obraz – identifikace vápenců	54

1 ÚVOD

Využití dálkového průzkumu Země (DPZ) se rozšiřuje na stále větší počet oblastí lidské činnosti. Od prvotního účelu pouhého pořízení snímku území se využití přeneslo také na vojenské účely a topografické mapování. Postupně se DPZ ujal jak pro účely zemědělství a lesnictví, tak i v meteorologii. Použití DPZ v geologii a geomorfologii tedy nemohlo být opomenuto.

V současné době má DPZ mnohostranné využití. V kartografii se hojně využívá pro topografické i tematické mapování a tvorbu digitálních modelů terénu. V zemědělství DPZ řeší řadu úkolů, především mapování zemědělských plodin, sledování zdravotního stavu plodin, odhady výnosů a sledování půdních charakteristik. Podobně v lesnictví slouží DPZ k zjišťování stavu vegetace, detekci lesních požárů, sledování přirozené obnovy lesních porostů nebo mapování odlesnění. Významné uplatnění nachází DPZ v hydrologii pro mapování mokřadů, sledování vlhkosti půd, monitoring zalednění, celou problematiku povodní, dynamika ledovců i mapování odvodňovacích pánví a vymezení povodí. DPZ velmi přispívá k tématům Landuse a Landcover a to v oblastech: základní mapování pro GIS, dynamika městského osídlení, územní plánování, monitoring přírodních katastrof – povodně, tornáda, vulkanická činnost, ochrana přírodních zdrojů. Pomocí dat DPZ byla vytvořena i jednotná databáze o využití a pokryvnosti CORINE Landcover. V poslední době se DPZ často zaměřuje na monitoring městské zástavby a urbanismus a to zejména využití země vybraných evropských měst v minulosti a současnosti, porozumění procesům ovlivňujících vývoj měst a jejich vlivu na životní prostředí a vytvoření modelů pro předpokládaný další vývoj města. DPZ se ale nezaměřuje pouze na pevninu, a tak nachází uplatnění i v oceánografii, kde sleduje mořské proudy, hloubku oceánů, teplotu vody, výskyt planktonu, kvalitu vody, mapuje znečištění, pobřežní vegetaci, pomáhá při navigaci a slouží k stanovení pobřežní čáry.

K prvnímu využití DPZ v geologii došlo již ve 30. letech 20. století. Jako první byly používány letecké snímky, které sloužili k mapování rozsahu geologických struktur, např. kvartérních sedimentů. S nástupem satelitních dat se využití DPZ v geologii rozšířilo do více oblastí. Oblasti využití dat DPZ zahrnují geologické mapování, strukturní analýzy, vyhledávání nerostných ložisek, geomorfologické studie, zhodnocení geologických rizik, posouzení následků těžby nerostných surovin a mnoho

dalších jako třeba sledování změn povrchu Země, mapování sesuvů, identifikace ploch dotčených acidifikací nebo posouzení stavu rekultivace např. po těžbě uhlí. Geologický výzkum pomocí DPZ se zaměřuje také na ostatní planety ve Sluneční soustavě, kde je naprosto klíčový pro informace o stavbě a složení vesmírných těles.

DPZ v geologii nenahrazuje původní metody geologického výzkumu. Identifikace hornin a minerálů přímo v terénu je stále nezastupitelnou součástí geologického mapování. Přesto data DPZ tvoří významnou část vstupních dat v rámci geologie. Je to především proto, že DPZ je „rychlou a nenákladnou“ metodou pro počáteční stádia geologického výzkumu před započítáním detailní terénní etapy. Zejména v aridních oblastech poskytuje DPZ jedinečný nástroj k mapování geologické stavby. Také v oblastech, kde nejsou k dispozici žádné geologické a mineralogické mapy, je užitečné předběžné zmapování území a detekce minerálních složek za pomoci DPZ. Ačkoliv data DPZ jsou výborným nástrojem pro mapování geologické stavby území, není toto mapování konečné a výsledky je nutné ověřit a rozšířit v terénu.

2 CÍLE PRÁCE

Cílem diplomové práce bylo provést analýzu metod DPZ, které se používají pro mapování a detekci minerálních složek hornin se zaměřením na určení obsahu křemíkové a vápníkové složky v horninách. Metody byly posuzovány z několika hledisek:

- vhodnost družicových dat,
- možnosti zpracování,
- analýza výsledků.

Detekce minerálních složek pomocí DPZ sebou přináší řadu problémů. Detekci minerálů umožňuje znalost jejich spektrálního projevu, především umístění absorpcí a minima vyzařování. Absorpce různých minerálů se mohou nacházet blízko sebe a neí tedy snadné tyto minerály od sebe identifikovat. Proto je velmi důležitý výběr vhodných družicových dat. Spektrální pásma družicových dat by měla být umístěna tak, aby umožňovala detekci vybraného minerálů, a také šířka pásem by neměla zahrnovat více absorpcí.

Situaci neusnadňuje ani fakt, že minerály se na zemském povrchu nevyskytují v čisté podobě, ale ve směsi s jinými minerály utvářejí horniny. Správnost identifikace vybrané minerální složky je tedy ztížena přítomností jiných minerálů.

Pro geologické účely je důležité zabývat se zemským povrchem bez vegetace, která by negativně ovlivnila získaný signál. Proto byla vybrána data zobrazující oblast Sečurské pouště v severozápadním Peru. Ke zpracování diplomové práce byly získány družicové snímky Landsat 7 ETM+ a Aster. Práce je zaměřena na posouzení vhodnosti těchto dvou typů dat a nalezení jejich limitů. Vedle dat Landsat 7 ETM+ a Aster byla navržena data dalších družic, která byla také vhodná k použití nebo i vhodnější.

Zpracování družicových dat představuje širokou škálu postupů a metod, od přípravy dat přes úpravy obrazu až k závěrečné interpretaci. Jednotlivé metody byly obecně popsány a některé z nich aplikovány na družicová data a následně byla zhodnocena jejich vhodnost pro účely této práce. Na základě dosažených výsledků byl navržen metodický postup pro zpracování družicových dat, který zahrnuje :

- předzpracování dat – radiometrické a geometrické korekce,
- zvýšení kvality obrazu – možnost vizuální interpretace dat,
- transformaci obrazu – převod spektrálních pásem pro možnou detekci minerálních složek,
- klasifikaci dat.

Metody zpracování obrazu použité pro detekci minerálních složek byly posuzovány z hlediska úspěšnosti identifikace vybrané minerální složky. Analýza výsledků byla provedena porovnáním dosažených výsledků s laboratorním spektrometrickým měřením.

3 LITERÁRNÍ REŠERŠE

Literaturu potřebnou k problematice mapování a detekce minerálních složek je možné rozdělit do čtyř základních kategorií:

1. předzpracování dat (zejména geometrické a radiometrické korekce),
2. principy DPZ a spektrální projevy minerálů a hornin,
3. metody zpracování obrazu,
4. metody mapování vybraných minerálních složek.

3.1 Předzpracování dat

Tématice předzpracování obrazu se věnuje řada autorů jak v zahraničí, tak u nás a většina literatury popisuje toto téma podobně. U problematiky atmosférických korekcí dochází k vytváření stále nových principů, a tak je literatura pestřejší.

Do tematiky předzpracování dat uvádí Halounová, Pavelka (2005). Geometrické korekce jsou popsány poměrně podrobně, zejména jejich matematický postup. Různé metody geometrických korekcí a jejich postup popisuje ještě podrobněji Dobrovolný (1998). Geometrickou korekcí se zabývá i Drury (2001). Přestože je toto téma u Druryho zmíněno pouze dodatečně, je popsáno poměrně výstižně a pro seznámení je postačující.

S atmosférickými korekcemi Halounová, Pavelka (2005) pouze seznamují, bez podrobnějšího popisu jednotlivých metod. Dobrovolný charakterizuje atmosférické korekce blížeji a vysvětluje i metodu nejtmašího pixelu. Lach, Kerekes (2008) se podrobně věnují metodě *Empirical line*. Atmosférickými korekcemi v oblasti tepelného infračerveného záření se zabývá Young, Johnson, Hackwell (2002), kteří vytvořili algoritmus *In-Scene Atmospheric Compensation* (ISAC).

3.2 Zpracování obrazu

Metody zpracování obrazu jsou jedním z podstatných témat DPZ, a proto se touto tematikou zabývá řada jak zahraničních tak i českých autorů. Halounová, Pavelka (2005) i Dobrovolný (1998) popisují základní principy jednotlivých metod. Také Drury (2001) věnuje podstatný prostor metodám zpracování obrazu. Navíc zmiňuje i metodu

dekorelačního roztažení. Všechny metody obsažené v literatuře spolu s aplikací na konkrétní data lze najít u Martínka, Kopačkové (2007). S pokročilejšími klasifikačními metodami seznamuje *Environment for Visualizing Images (ENVI) Tutorial*. Rowan (2003) používá pro klasifikaci *Spectral Angle Mapper*. van der Meer, de Jong (2006) vedle této metody aplikuje i *Spectral Feature Fitting*. Algoritmus *Spectral Feature Fitting* jako první ale popisují Clark, Swayze (1995).

Zpracování dat se v současné době nově zaměřuje na hyperspektrální data. Těm se věnuje a nové metody vytváří především van der Meer, de Jong (2006).

3.3 Spektrální projevy minerálů a hornin

Spektrálním projevům minerálů a hornin se u nás nevěnuje téměř nikdo. Halounová, Pavelka (2005) pouze seznamují se základními principy. Kolář (1982) popisuje původ spektrálních projevů minerálů a hornin a navíc se zaměřuje i na charakteristické znaky silikátů.

V zahraničí je toto téma často popisováno. Drury (2001) uvádí spektrální křivky významných minerálů. Také zmiňuje důležité faktory, které ovlivňují spektrální křivku silikátů. Spektrálními projevy vápenců se zabývá pouze Clark (1995), který se ve svém článku zabývá pouze spektrálními projevy a proto popisuje velkou řadu minerálů.

Poměrně podrobně se DPZ v geologii a spektroskopii věnují internetové stránky USGS. Geologické aplikace popisuje van der Meer, Yang (2006). Ninomiya (2005) popisuje jak vznik spektrálních projevů, tak i konkrétní projevy. Protože se specializuje na data ASTER, spektrální projevy minerálů jsou dány do souvislosti s těmito družicovými daty a doporučena vhodná pásma pro detekci určitých minerálů.

3.4 Metody mapování silikátů a vápenců

Problematika mapování a detekce silikátů a vápenců je v zahraničí často řešena a jsou vytvářeny i nové metody. Ninomiya (2005) se ve své práci zaměřuje na určení litologické stavby území na datech ASTER. Snaží se určit silikáty a karbonáty a vytváří pro jejich detekci indexy - *Quartz Index (QI)*, *Carbonate Index (CI)* a *Mafic Index (MI)*.

Mapováním litologie se zabývá také Rowan, Mars (2003). Stejně jako Ninomiya (2005) i Rowan, Mars (2003) pracují s daty ASTER. Zaměřují se ale na vápence a

identifikují je pomocí metody *Relative Absorption-Band Depth* (RBD). Tuto metodu konkretizují pro pásma dat ASTER. Navíc používají i metodu dekorelačního roztažení.

Katra, Lancaster (2008) se zabývají dynamikou sedimentů. K tomuto úkolu používají data z tepelné oblasti spektra. Pro detekci minerálních složek, mimo jiné i silikátů a vápenců, používají také metodu dekorelačního roztažení.

V naší republice je tato oblast využití DPZ málo zpracovávána. Martínek, Kopačková (2007) shrnují základní metody DPZ v geologii. Z hlediska detekce minerálních složek zmiňují mineralogický index vytvořený pro data ETM+.

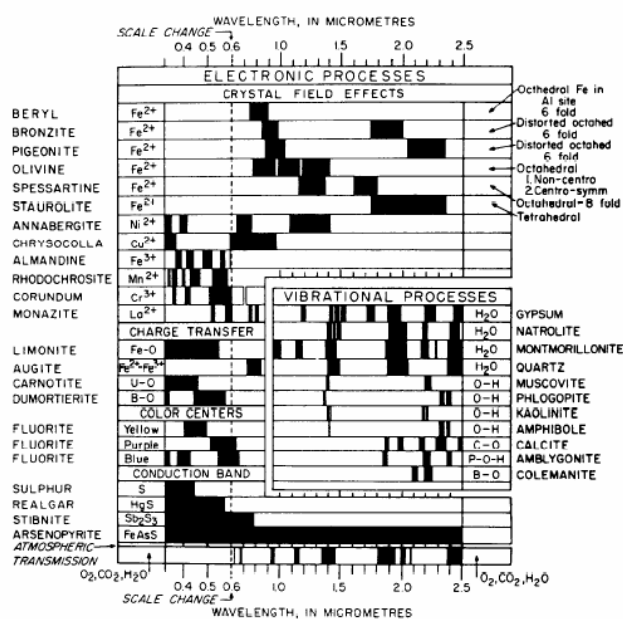
Nejvíce se touto problematikou zabývá Kopačková (2009), ale protože jejím cílem je spíše čistě geologická tematika a detekce minerálů není hlavním cílem, použité metody jsou převzaté z literatury a nové nejsou popsány.

4 SPEKTRÁLNÍ VLASTNOSTI MINERÁLŮ A HORNIN

Spektrální vlastnosti elektromagnetického záření v minerálech a horninách jsou výsledkem dvou hlavních interakčních mechanismů – elektronového přenosu a vibračního přenosu. Elektronový přenos v atomech vyžaduje více energie než vibrační přenos v molekulách, proto elektronový přenos je charakteristický pro krátké vlnové délky ultrafialového záření *Ultraviolet* (UV, 0,03-0,38 μm) a viditelného záření *Visible* (VIS, 0,38-0,72), zatímco v delších vlnových délkách *Short-Wave InfraRed* (SWIR, 1,0–3,0 μm) dominuje vibrační přenos (Drury 2001).

Na úrovni atomu může dojít k přeskoku elektronů z jedné energetické hladiny do druhé nebo k výměně nebo k přenosu náboje mezi ionty. Většina elektronových přenosů v minerálech je způsobena neobsazenými elektronovými plášti přenášených prvků. Nejvýznamnějším přenosovým prvkem v minerálech je železo (Clark 1995). Přeskok elektronů z jedné energetické hladiny do druhé je zodpovědný za většinu absorpcí v minerálech ve VIS a blízké infračervené oblasti *Near InfraRed* (NIR, 0,72-1,3 μm). Pozice této absorpce (viz obr. 1) je silně závislá na symetrii, stupni distorze krystalové mřížky a koordinaci Fe^{2+} v různých minerálech (Drury 2001).

Příkladem přenosu náboje mezi ionty je migrace železa na kyslík, jehož výsledkem je široký absorpční pás ve vlnových délkách kratších než 0,55 μm . Tato vlastnost oxidů železa je důležitá pro rozpoznání hornin, ve kterých je hlavní složkou Fe_2O_3 (Metelka 2005).

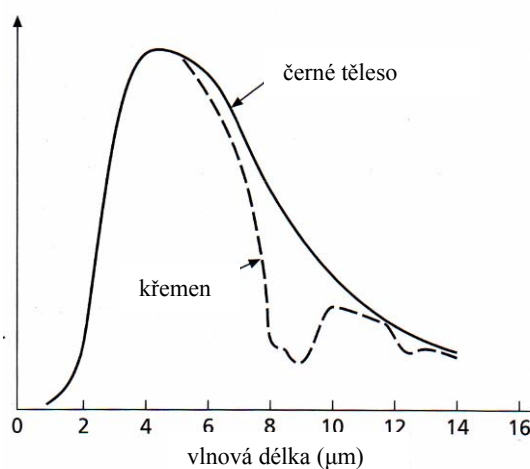


Obr. 1: Absorpční pásy vybraných minerálů (Clark 1995)

Vibrační přenos způsobuje změny v relativním rozložení atomů v molekule – překroucení vazby – roztažení nebo zakřivení z jednoho rovnovážného stavu do jiného. K vibračním přenosům v minerálech dochází hlavně ve SWIR části spektra, kde jsou spojeny s přítomností OH⁻ iontů a molekulami vody (vazba H-O-H). OH⁻ ionty obsahuje mnoho silikátů a přeměněných minerálů a je pro ně typický absorpční pás blízko vlnové délky 2,7 μm . Vibrační přenosy jsou charakteristické i pro karbonátové minerály. Za absorpci okolo 2,3 μm je zodpovědná vazba C-O.

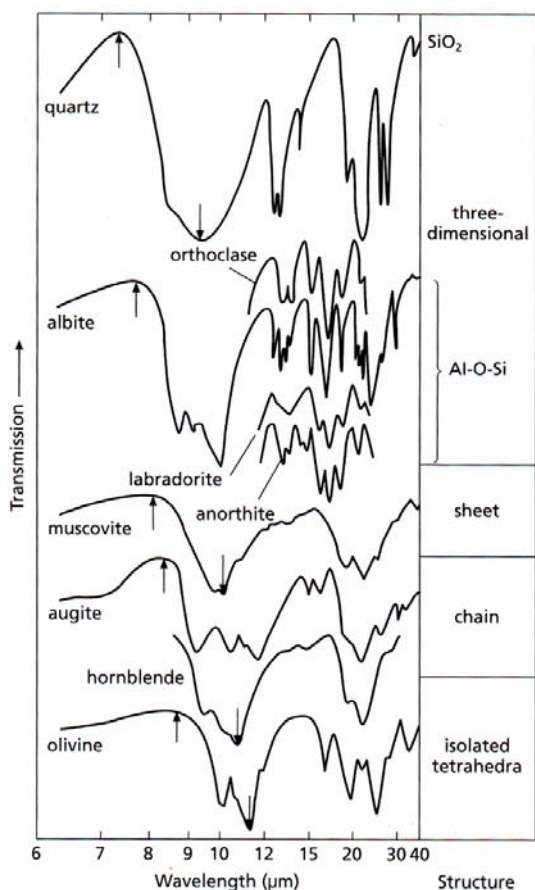
4. 1 Spektrální vlastnosti silikátů

Křemen, jako hlavní zástupce silikátů, vyzařuje stejně jako ideální černé těleso až do 6 μm . Srovnání vyzařování křemene a černého tělesa v závislosti na vlnové délce je ukázáno na obr. 2. Propad mezi 8 a 9 μm je výsledkem vibračního pohybu vazby Si-O. Další propad v okolí 20 μm vzniká vlivem vazby O-Si-O (Kolář 1982). Charakteristickou vlastností silikátů je, že minimum hlavní absorpce se posunuje podle typu silikátové vazby (viz obr. 3). Křemík ve vazbě SiO₂ má minimum vyzařování na vlnové délce 9,3 μm , s přibývajícimi vazbami se minimum posunuje do delších vlnových délek a minimum vyzařování pro křemík vázaný jako SiO₄ už je na vlnové délce okolo 11 μm . Částečně je to způsobeno tím, že různé struktury SiO₄ tetrahedra sdílí kyslík různými způsoby. Posunující se minimum koresponduje s přechodem od světlých k tmavým minerálům. (Drury 2001)

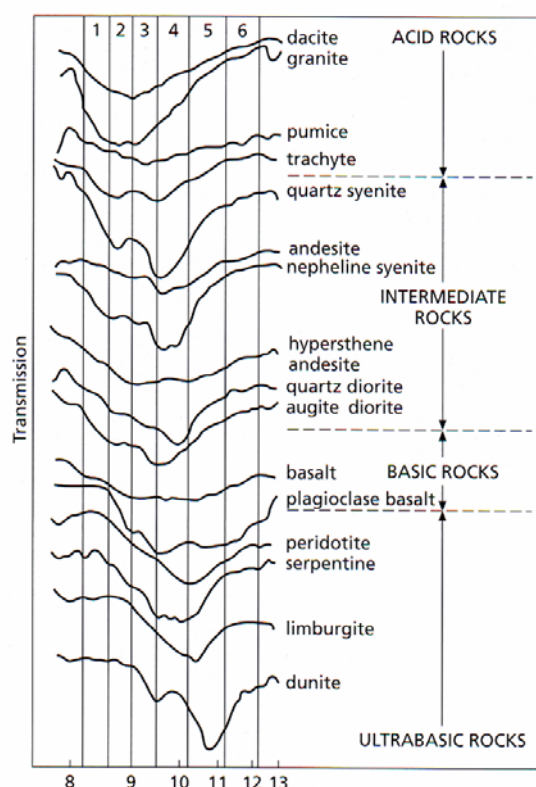


Obr. 2: Porovnání vyzařování černého tělesa a křemene při 600K (Drury 2001)

Vliv obsahu SiO_2 na spektrální křivku silikátů je patrný na obr. 4. S úbytkem obsahu SiO_2 se maximum odrazivosti posouvá k delším vlnovým délkám. Minimum vyzařování se nachází v kratších vlnových délkách pokud se jedná o kyselé horniny. Se snižující se kyselostí horniny a se zvyšující se zásaditostí minimum postupuje do delších vlnových délek. Silně zásadité silikáty ($< 45\% \text{SiO}_2$) např. dunit vykazují emisní minimum kolem $11\text{ }\mu\text{m}$. Naopak kyselé silikáty ($> 65\% \text{SiO}_2$) např. tektity nebo obsidián mají minimum na $9,2$ resp. $9,3\text{ }\mu\text{m}$ (Kolář 1982).



Obr. 3: Posun minima a maxima vyzařování způsobené typem vazby Si-O (Drury 2001)

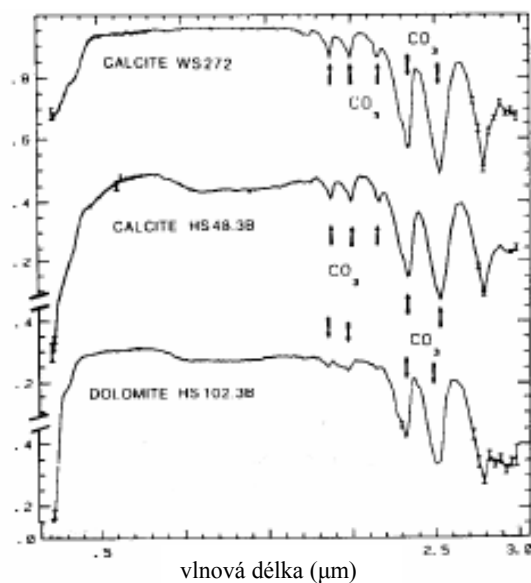


Obr. 4: Posun minima vyzařování podle obsahu SiO_2 (Drury 2001)

4. 2 Spektrální vlastnosti vápenců

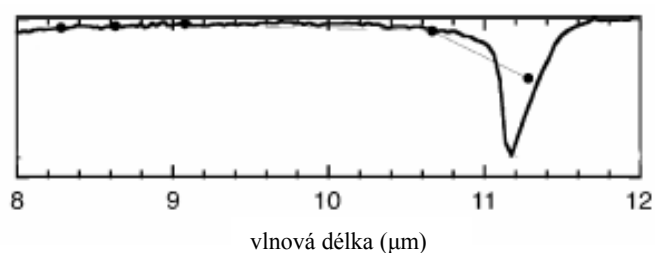
Na rozdíl od silikátů, které se významně spektrálně projevují především až v oblasti tepelného pásma *Thermal InfraRed* (TIR, $8.0\text{--}13.0\text{ }\mu\text{m}$), vápence mají svůj charakteristický spektrální projev už od NIR. Spektrální projev vápenců je ovlivněn

především vibrační absorpcí iontu CO_3^{2-} . Vibrace se začíná objevovat od vlnové délky 1,7 μm . Okolo vlnové délky 2,33 μm (viz obr. 5) se nachází absorpční pás typický pro vápenec a dolomit (Clark 1995).



Obr. 5: Absorpční pásy vápence a dolomitu v NIR (Clark 1995)

Vápence v oblasti TIR se téměř neprojevují. Až skoro do vlnové délky 11 μm je jejich spektrální křivka plochá. Kromě malé absorpce (viz obr. 6) okolo 11,4 μm (vápenec) resp. 11,2 μm (dolomit) je jejich spektrální křivka vyrovnaná (Ninomiya 2005).



Obr. 6: Absorpční pás vápenců v TIR (Ninomiya 2005)

5 METODY PRO MAPOVÁNÍ OBSAHU SILIKÁTŮ A KALCITŮ V HORNINÁCH

Metody pro mapování obsahu silikátů a kalcitů v horninách vycházejí z obecných metod pro zpracování dat DPZ. Dají se rozdělit do dvou základních skupin a to na metody zvýraznění obrazu a klasifikační metody. Zvýrazněním obrazu se obraz vylepšuje pro další vizuální interpretaci. Zvýraznění lze provádět např. roztažením kontrastu, prostorovými úpravami jako jsou filtry nebo konvoluce nebo použitím více pásem. Použití více pásem zahrnuje barevnou syntézu, poměry pásem a transformace obrazu. Roztažení kontrastu by nebylo dostatečně účinné pro detekci minerálů a prostorové úpravy se používají pro detekci lineamentů. Proto jsou podrobněji popsány metody zvýraznění pomocí více pásem.

5. 1 Barevná syntéza

Základní metodou pro snadnější interpretaci sledovaného jevu je barevná syntéza. Barevná syntéza je způsob zobrazení, při kterém se používají tři základní barvy červená (R), zelená (G) a modrá (B), do kterých se vloží tři vybraná spektrální pásma. Výsledek je zobrazen ve skutečných barvách, pokud jsou použita pásma z viditelné části spektra a jsou přiřazeny příslušným barvám. Jestliže je použito pásmo z jiné oblasti spektra než z viditelné části, jedná se o zobrazení v nepravých barvách (Halounová, Pavelka 2005).

Nejdůležitějším krokem této metody je správný výběr pásem. Při jejich výběru může pomoci statistická analýza pásem. Vhodné je kombinovat vzájemně nekorelovaná pásma tak, aby nedocházelo k redundantnosti informace. Pro umístění pásem platí pravidlo: pásmo, které nese nejdůležitější informaci, se vkládá do červené, méně důležité do zelené a nejméně důležité do modré (Drury 2001).

Pro mapování různých typů silikátů a vápenců senzorem ASTER je doporučena kombinace tepelných pásem 13 – 12 – 10 (Stefanov 2005).

Metoda barevné syntézy se používá samostatně nebo pro výsledné znázornění složitějších metod (poměr pásem, analýza hlavních komponent nebo dekorelačního roztažení).

5. 2 Poměr pásem

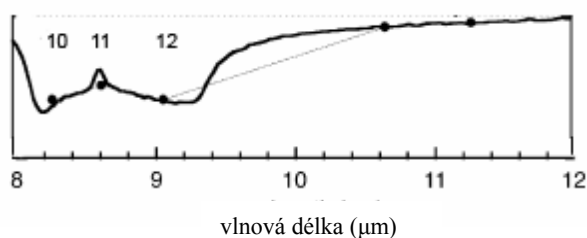
Vedle vložení pásem do RGB syntézy lze provádět se spektrálními pásmy různé aritmetické operace, nejčastěji různé podíly. Výhodou dělení pásma pásmem je eliminace albeda a topografického vlivu (Metelka 2005). Výpočtem podílu pásem je možné objevit i poměrně malé rozdíly mezi různými typy hornin a rozdíly, které na původních datech nebyly patrné. Do poměru se dávají pásma, ve kterých má sledovaný objekt charakteristický spektrální projev - maximální absorpci a maximální odrazivost (Martínek, Kopačková 2007). Sledovaný objekt tím získá novou hodnotu, která je odlišná od objektů, které mají ve vybraných pásmech jiné spektrální vlastnosti.

Pro detekci konkrétních hornin a minerálů byly vytvořeny mineralogické indexy. Pro rozpoznání jílových minerálů senzorem TM je vhodný poměr 5/7 (Drury 2001). Jílové minerály se zobrazí v tmavších odstínech.

Hewson (2005) pro mapování jednotek bohatých na křemen zavádí pro senzor ASTER poměr pásem 13/10. Ninomiya (2005) vytváří hned několik indexů, pro křemen, pro karbonáty a pro obsah SiO₂. V definici indexu pro křemen (*Quartz index*, *QI*) se liší a definuje jej takto:

$$QI = \frac{11 \times 11}{10 \times 12} .$$

Vychází z toho, že absorpční minimum je v 10. a 12. pásmu ASTERu a 11. pásmo má absorpci vyšší (viz obr. 7). *QI* dosahuje pro křemen hodnot 1,05 a vyšších, pro silikáty obecně postačí již *QI* > 1,03.



Obr. 7: Spektrální křivka křemene s vyznačením pásem ASTERu (Ninomiya 2005)

Pro kalcit a dolomit, dva hlavní zástupce karbonátů, vznikl *Carbonate index* (*CI*), tvořený podílem pásem 13 / 14. Kalcit a dolomit lze dobře detekovat při hodnotách *CI* > 1,045.

Z vlastností silikátů, že minimum odrazivosti se posunuje do delších vlnových délek v závislosti na snižování obsahu SiO₂, byl pro ASTER vytvořen *Mafic index*

(MI). Tentokrát jsou do poměru dána pásma 12 / 13. MI je nepřímo úměrný obsahu SiO_2 . Horniny s obsahem $\text{SiO}_2 < 60 \%$ je možné identifikovat při hodnotách $\text{MI} > 0,9$.

Poměry pásem se často zobrazují pomocí barevné syntézy. Pro data TM se používá barevná syntéza 5/7 – 5/4 – 3/1. Tato syntéza tzv. kombinovaná mineralogická kombinace je složena z indexu pro jílové minerály (5/7), železité minerály (5/4) a oxidy kovů (3/1) (Martínek, Kopačková 2007). Modře se v tomto případě zobrazují materiály s vysokým obsahem křemene, zeleně minerály bohaté na vápník a žlutě karbonáty (Kopačková 2009).

Ninomiya (2005) vytvořil barevnou syntézu pro mineralogické indexy. QI se umístí do R, CI do G a MI do B. Horniny bohaté na křemen se zobrazí červeně, karbonáty zeleně a místa s nízkým QI, nízkým CI a vysokým MI – silikáty modře.

Metoda *Relative absorption – band depth* (RBD) byla vytvořena pro znázornění Al-O-H, Mg-O-H a CO_3 , ale lze ji použít pro jakýkoliv objekt s typickou absorpcí (Rowan, Mars 2003):

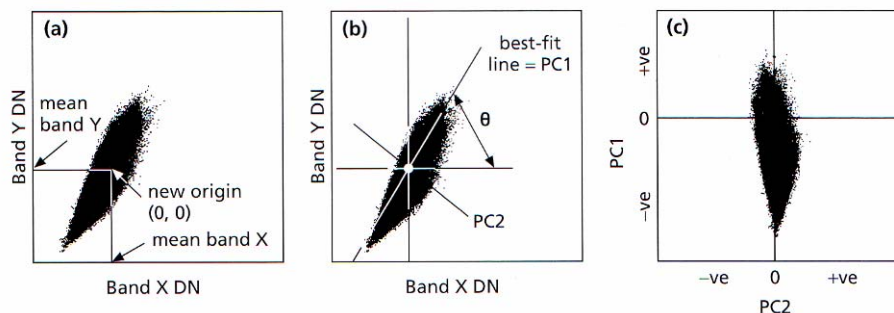
$$RBD = \frac{1+2}{3}.$$

V čitateli je součet pásem na ramenech absorpce a ve jmenovateli je pásmo nejbližší absorpčnímu minimu. K identifikaci vápence (absorpce Ca-CO_3) z ASTERu slouží

$$RBD = \frac{7+9}{8}, \text{ pro dolomit (absorpce Ca, Mg-CO}_3\text{) je } RBD = \frac{6+8}{7}.$$

5.3 Analýza hlavních komponent

Analýza hlavních komponent (*Principal Component Analyses*, PCA) je jednou z metod, které řeší vysokou korelaci mezi pásmy. Dojde ke kompresi informací z původních n pásem do menšího počtu pásem, tzv. komponent, které se pak použijí místo původních dat. Hodnoty spektrálních pásem jsou vyneseny do grafu, kde tvoří shluky, tzv. místa korelace. Následně dochází k zavedení nových os, které jsou oproti původním osám otočeny a počátek je posunut do průměru (viz obr. 8). První nově zvolená osa, 1. hlavní komponenta (PCA1), je zvolena ve směru největšího rozsahu hodnot. Další osa, 2. hlavní komponenta (PCA2), je na ni kolmá. V případě více než dvou pásem jsou vypočteny i další komponenty.



Obr. 8: Postup tvorby PCA a) vysoká korelace mezi dvěma pásmy, b) vytvoření nové osy PC1 ve směru největšího rozptýlu hodnot a osy PC2 naní kolmé, c) osy jsou otočeny o úhel θ , aby bylo dosaženo maximální odchylky dat (Drury 2001)

Výsledkem jsou nové rastry a statistické parametry provedené analýzy. Statistická analýza vedle kovariačních a korelačních koeficientů obsahuje i transformační koeficienty PCA (*eigenvalues* a *eigenvectors*). *Eigenvectors* určují míru, jakou se jednotlivá vstupní pásma podílejí na variabilitě v rámci jednotlivých nově vypočítaných PCA a *eigenvalues* určují podíl jednotlivých PCA na celkové datové variabilitě (Martínek, Kopačková 2007). Hodnoty *eigenvectors* jednotlivých komponent mají souvislost se spektrálními vlastnostmi (Drury 2001). Jílové minerály mají vysokou odrazivost v 5. pásmu TM a silnou absorpci v 7. pásmu (viz Tab.1). Podobné vlastnosti má 4. komponenta. Na snímku 4. komponenty budou tedy jílové minerály identifikovatelné lépe než na snímcích ostatních komponent.

	Eigenvalues	Eigenvectors					
		Band 1	Band 2	Band 3	Band 4	Band 5	Band 7
PC1	2242	0.27	0.21	0.37	0.31	0.68	0.42
PC2	284	0.58	0.32	0.40	0.27	-0.48	-0.32
PC3	18	-0.48	-0.11	0.11	0.67	0.18	-0.52
PC4	11	-0.44	0.01	0.37	0.23	-0.50	0.60
PC5	6	0.31	-0.14	-0.67	0.57	-0.16	0.29
PC6	1	-0.27	0.91	0.32	0.00	0.00	0.00

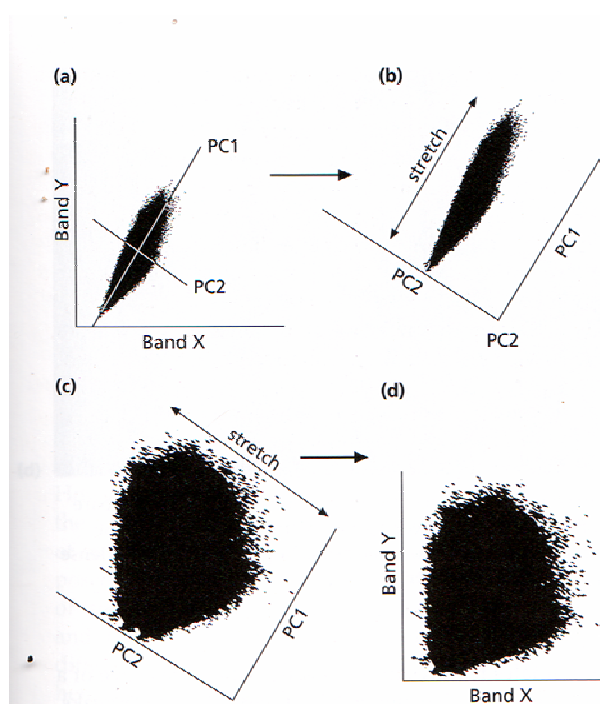
Tab. 1: Ukázka transformačních koeficientů PCA (Drury 2001)

5. 4 Dekorelační roztažení

Metoda dekorelačního roztažení (*Decorrelation stretching*, DCS) navazuje na analýzu hlavních komponent. Po vytvoření nových os a rotace, mohou být hodnoty dat roztaženy ve směru nových os a prostor je tak lépe využit. Následně jsou osy otočeny zpět do původní pozice (viz obr. 9).

Dekorelační roztažení je metoda v geologii často používaná. Abrams, Hook (2006) takto upravili 14., 12. a 10. pásmo ASTERu a vytvořili z nich barevnou syntézu. Červeně se zobrazil křemen a zeleně karbonáty. Stejnou kombinací pásem pro DCS používá i Kutra (2008). Rowan (2003) naopak pro metodu DCS použil pásma 13, 12 a 10. Při této kombinaci má křemen červenou barvu a karbonáty modrou.

Vaughan (2003) aplikoval metodu DCS na data senzoru SEBASS konkrétně na pásmo 67 (11,9 μm), 36 (9,6 μm) a 25 (9,02 μm). Po vytvoření barevné syntézy z těchto pásem jsou oblasti s dominancí křemene žluté, oblasti bohaté na jílové minerály purpurové a oblasti se směsí křemene, živce a jílu hnědooranžové.



Obr. 9: Postup DCS a) graf korelačního shluku dvou pásem spolu s hlavními komponenty, b) roztažení histogramu ve směru PC1, c) roztažení ve směru PC2, d) rotace do původní pozice (Drury 2001)

5. 5 Klasifikace

Jednodušší identifikaci základních prvků ve snímku umožňuje klasifikace obrazu. Cílem klasifikace je nahradit hodnoty radiometrických charakteristik původního obrazu, které vyjadřují spektrální vlastnosti objektů, hodnotami vyjadřujícími tzv. informační třídy. Klasifikace je založena na použití rozhodovacích pravidel - klasifikátorů, podle kterých se třídy vytvářejí. Klasifikátory mohou být založeny na spektrálním, prostorovém nebo časovém chování objektů. Klasifikátory spektrálního chování se

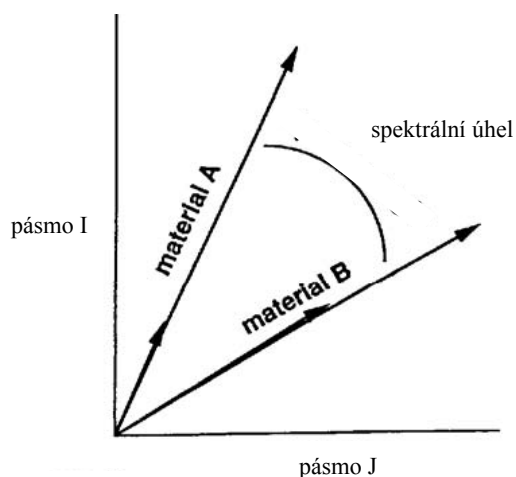
používají nejčastěji. Podle toho, jestli jsou předem definovány třídy pomocí trénovacích množin, se dále klasifikace dělí na řízené a neřízené.

Autoři zabývající se klasifikací snímků pro geologické účely upřednostňují ve své práci tři typy klasifikace:

1. *Iterative Self-Organising Data Analysis Technique (ISODATA)*,
2. *Spectral Angle Mapper (SAM)*,
3. *Spectral Feature Fitting (SFF)*.

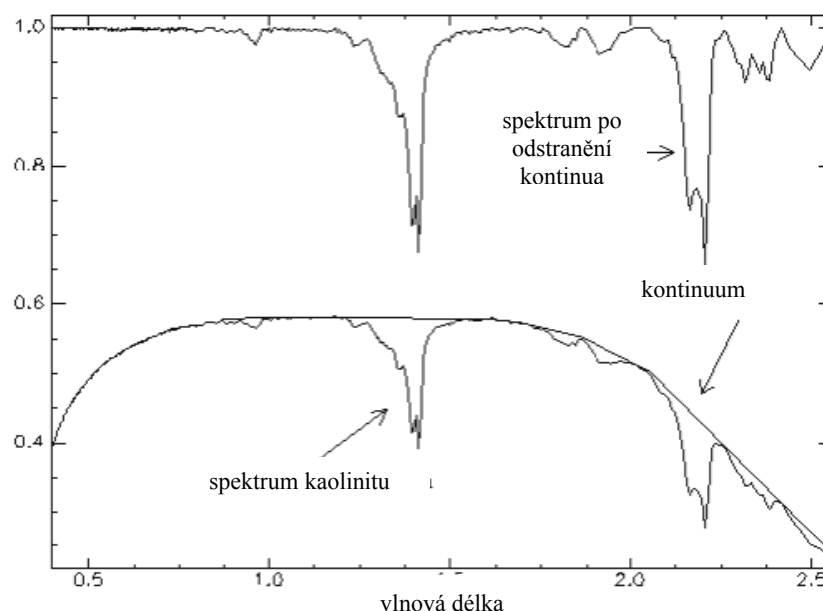
ad1. Při neřízené klasifikaci využívající algoritmus ISODATA nejsou vybírány trénovací plochy a automaticky jsou vytvářeny shluky na základě vzájemné podobnosti objektových hodnot. Pro zatřídění se posuzují hodnoty obrazové funkce v rámci všech pásem a objekty jsou iteračním výpočtem rozděleny do shluků (Halounová, Pavelka 2005). Na počátku klasifikace s pomocí klasifikátoru ISODATA je definován počet požadovaných shluků a počet iterací. Důležitá je také směrodatná odchylka od průměru třídy definovaná na začátku, která stanovuje, zda je shluk považován za heterogenní a bude rozdělen na dva nové shluky, nebo zda bude více shluků spojeno do jednoho.

ad2. Klasifikace postupem SAM porovnává spektrum snímku se spektrem referenčním nebo se spektrální knihovnou Rowan (2003). Algoritmus SAM určuje podobnost mezi dvěma spektry počítáním spektrálního úhlu mezi nimi (viz obr. 10). Se spektry se zachází jako s vektory v n-rozměrném prostoru, kde n je počet pásem vstupujících do klasifikace. Do třídy jsou zařazeny pouze pixely, jejichž spektrální úhel mezi jejich spektrem a referenčním spektrem je menší než požadovaná hodnota.



Obr. 10: Princip Spectral Angle Mapper (ENVI Tutorial)

ad3. Nejen pro multispektrální, ale hlavně pro hyperspektrální snímky doporučuje van der Meer a de Jong (2006) algoritmus SFF. Je známý jako algoritmus TRICORDER (Clark, Swayze 1995). Přípravou pro SFF je vytvoření spektra bez kontinua (viz obr. 11). Kontinuum je matematická funkce k odstranění jednotlivých absorpcí a k vyrovnání spektra.



Obr. 11: Spektrum s kontinuem a po odstranění kontinua (ENVI Tutorial)

Po odstranění kontinua probíhá vlastní algoritmus SFF a jeho výsledkem je škálovaný obraz. Mezi každým pixelem vstupního spektra a referenčním spektrem je pro všechna pásma vypočteno vyrovnání metodou nejmenších čtverců. Z odchylek RMS (*Root mean square*) tohoto vyrovnání je vytvořen RMS obraz, který je dalším výstupem SFF. Nízké hodnoty RMS obrazu korespondují s dobrou spektrální podobností vstupního spektra s referenčním. Posledním výsledkem je podíl škálovaného a RMS obrazu nazývaný *Fit*. Jasné pixely v tomto obraze znamenají nejlepší podobnost s referenčním spektrem.

6 POUŽITÁ DATA

6.1 LANDSAT 7 ETM+

Program Landsat je řadou družicových misí určených k pozorování Země, řízených NASA a USGS (USA). Data jsou pořizována již od roku 1972, kdy byla na oběžnou dráhu vynesena první z těchto družic.

V pořadí již sedmá družice z řady Landsat byla úspěšně vypuštěna 15.4.1999 ve 20:32 hod letního středoevropského času jako zatím poslední z dlouhé řady družic nejstaršího programu v historii civilního družicového dálkového průzkumu. Do vesmíru byla vynešena raketou Delta II. Nový satelit má několik vylepšení oproti předešlým družicím této řady, avšak zachovává kontinuitu v datové řadě *Thematic Mapperu* zahájenou Landsatem 4 v roce 1984. Hlavním vybavením družice Landsat 7 je skener *Enhanced Thematic Mapper Plus* (ETM+), který je osmikanálový multispektrální mechanický skener, pořizující data ve směru nadíru.

Pásma 1 – 4 snímají v oblasti VNIR a jejich prostorové rozlišení je 30 m (viz tab. 2). Stejně je rozlišení pásem 5 a 7, které zachycují oblast SWIR. Pásmo 6 snímá v oblasti tepelného záření a má nižší rozlišení 60 m. 8. pásmo je panchromatické s rozlišením 15 m. Současné jsou pořizována ortofota – snímky s odstraněnými chybami způsobenými nerovnostmi reliéfu a geometrií senzoru, a to s přesností až 30 m. Z Landsatu 7 jsou poskytována také multispektrální data již prokreslená panchromatickým pásmem.

spektrální pásmo	spektrální rozlišení [μm]	prostorové rozlišení [m]
1	0.45 - 0.52	30
2	0.52 – 0.60	30
3	0.63 – 0.69	30
4	0.76 – 0.90	30
5	1.55 – 1.95	30
6	10.4 – 12.5	60
7	2.08 – 2.35	30
8	0.522 – 0.90	15

Tab. 2: Spektrální rozsah Landsat 7 ETM+ (Landsat USGS, 2009)

Přibližná velikost snímané scény je 170 km x 185 km. Výška letu je 705 km (viz tab. 3). Družice se pohybuje po slunečně synchronní dráze s inklinací 98,2°. K návratu na stejné místo dojde za 16 dní.

Šířka záběru:	185 km
Doba oběhu:	16 dní
Výška letu:	705 km
Orbita:	heliosynchronní
Inklinace:	98,2°
Čas přeletu rovníku:	10:00 +/- 15 min
Nosná raketa:	Delta II
Datum vypuštění:	15. 4. 1999

Tab. 3: Specifikace družice Landsat 7 ETM+ (Landsat USGS, 2009)

Snímky se pořizují ve třech základních variantách podle úrovně korekcí (Landsat USGS, 2009):

1. *Standard Terrain Correction (Level 1T)* - data jsou opravena o systematické a radiometrické chyby, pro geometrické korekce jsou připojeny vlíčovací body, pro topografickou korekci musí být použit DEM (*Digital Elevation Model*),
2. *Systematic Terrain Correction (Level 1Gt)* – data jsou opravena o systematické, radiometrické a geometrické chyby, pro topografickou korekci musí být použit DEM,
3. *Systematic Correction (Level 1G)* – data jsou systematicky, radiometricky a geometricky přesná, opravy byly odvozeny z údajů senzoru a družice.

Na konci května 2003 došlo k závadě mechanismu skenovacího zrcátka senzoru ETM+, která velmi ovlivnila další činnost tohoto přístroje na družici Landsat 7. Na aktuálně snímaných scénách chybí přibližně 25% dat.

Snímky ETM+ poskytují přehled o aktuální situaci v území a o využití krajiny. Na snímcích lze rozlišit různé typy vegetačních druhů a jejich zdravotní stav, mapovat typy půd, vlhkost povrchu a další.

Pro práci byly použity 2 snímky Landsat ETM+. Scéna p011r063_7k20001225_z16 byla pořízena 25. 12. 2000 a scéna p011r064_7k20010211_z17 byla pořízena 11. 2. 2001.

6. 2 ASTER

V prosinci roku 1999 byla na oběžnou dráhu vypuštěna družice Terra. Na její palubě je pět zařízení a jedním z nich je zde popisovaný skener ASTER (*The Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer*). Za jejím vznikem stojí několik národů, pod taktovkou NASA se na něm podíleli Kanadská a Japonská kosmická agentura. Parametry oběžné dráhy Terry jsou shodné s Landsatem 7, který je také 705 km (viz tab. 4) nad povrchem a má návratnost nad stejné místo na povrchu každý 16. den. Nejen parametry dráhy, ale i produkovaná data jsou s Landsatem srovnatelná.

Šířka záběru:	60 km
Doba oběhu:	16 dní
Výška letu:	705 km
Orbita:	heliosynchronní
Inklinace:	98,3°
Čas přeletu rovníku:	10:30 +/- 15 min
Datum vypuštění:	18. 12. 1999

Tab. 4: Specifikace skeneru ASTER (Abrams, Hook, Ramchandran 2002)

Skener ASTER snímá ve 14 spektrálních pásmech. Tři pásma (1-3) jsou ve viditelném záření a blízkém infračerveném s prostorovým rozlišením 15 m, šest (4 – 9) v oblasti SWIR záření s rozlišením 30 m a pět (10 – 14) v termálním infračerveném záření s rozlišením 90 m (viz tab. 5). ASTER je unikátní ze dvou důvodů. Za prvé poskytuje data z termální části spektra ve vysokém prostorovém, ale i spektrálním, rozlišení a za druhé se při snímání dat snaží především pokrýt poptávku ze strany uživatelů.

Produktů ze skeneru ASTER je celá řada, zpracovávány jsou především v Japonsku a můžeme je dělit do třech úrovní (Abrams, Hook, Ramchandran 2002):

- Level 0R – základní formát dat s přidanými kalibračními soubory ,
- Level 1R – data bez geometrické korekce ale radiometricky korigovaná spolu s kalibračními parametry (údaje o aparatuře, funkci zrcátka, vnitřním kalibračním zářivém zdroji,
- Level 1G – data radiometricky a geometricky korigovaná spolu s kalibračními parametry, data jsou převzorkovaná a transformovaná do zvoleného mapového zobrazení.

Kombinace širokého spektrálního rozlišení a vysokého prostorového rozlišení určuje data ASTER k využití řešení otázek o zemském povrchu. Ideální je pro geologické studie, sledování dynamiky vegetace a ekosystémů nebo monitoring ohrožení.

	spektrální pásmo	spektrální rozsah [μm]	RS [m]
VNIR	1	0.52-0.60	15
	2	0.63-0.69	
	3N	0.78-0.86	
	3B	0.78-0.86	
SWIR	4	1.60-1.70	30
	5	2.145-2.185	
	6	2.185-2.225	
	7	2.235-2.285	
	8	2.295-2.365	
	9	2.360-2.430	
TIR	10	8.125-8.475	90
	11	8.475-8.825	
	12	8.925-9.275	
	13	10.25-10.95	
	14	10.95-11.65	

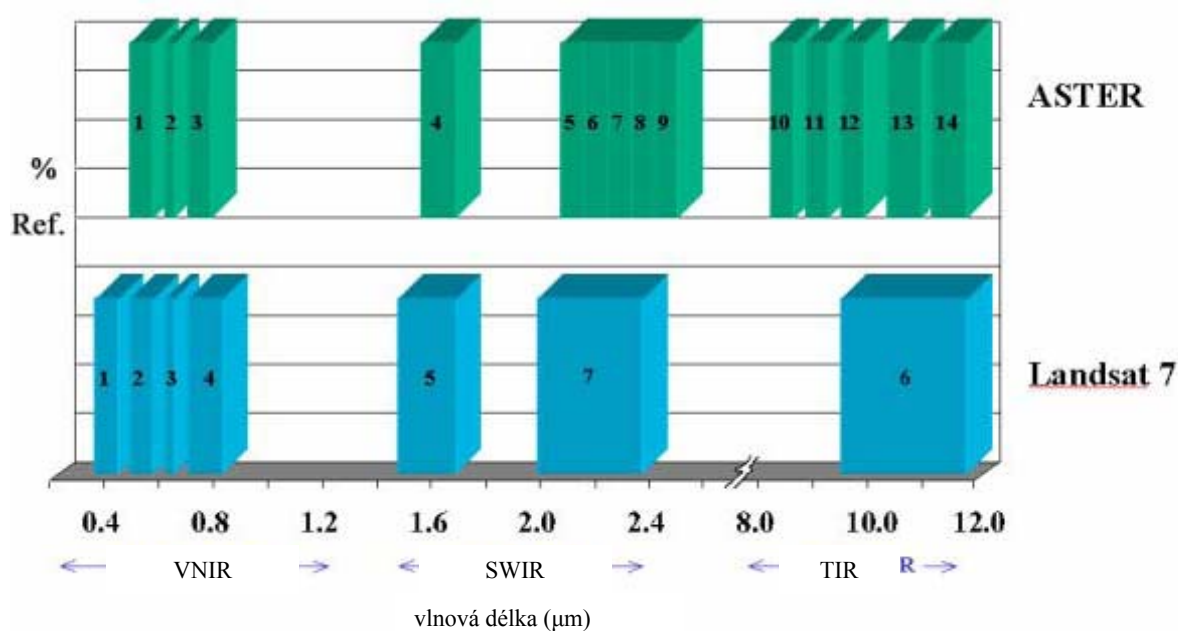
Tab. 5: Přehled spektrálního rozsahu a RS pro ASTER (Abrams, Hook, Ramchandran 2002):

V práci byly použity tři scény ASTER.

Scény AST14DMO_00305252006154431_20070807112457_12588 a
AST14DMO_00305252006154440_20070807112457_12590 byly pořízeny 25. 5.

2006, scéna AST14DMO_00302282007155153_20071123151755_29126 vznikla 28.2.2007.

I když jsou si data skenerů ETM+ a ASTER v mnoha parametrech podobná, liší se spektrálním rozlišením. Obr. 12 znázorňuje vzájemné postavení spektrálních pásem. Pásma zaujímají přibližně stejné oblasti, ale pásma ASTER jsou mnohem užší a je jich větší počet. Tak např. oblast pokrytou 7. pásmem ETM+ snímá 5. – 9. pásmo ASTER a oblast snímaná 6. pásmem ETM+ je rozdělena mezi pásmo 12 – 14 ASTER.



Obr. 12: Porovnání spektrálních pásem Landsat 7 ETM+ a ASTER (Abrams, Hook, Ramchandran 2002)

7 POPIS OBLASTI

Sečurská poušť, také známá jako peruánsko – chilská poušť, je jedna z největších pouští Jižní Ameriky (viz obr. 13). Prostírá se severně od pouště Atacama na západním pobřeží Peru. Poušť zaujímá pás podél tichomořského pobřeží, je 280 km dlouhá a průměrně 90 km široká, v nejširším místě až 180 km široká (viz obr. 14). Reliéf pouště je relativně plochý.



Obr. 13: Mapa Peru s vyznačeným zájmovým územím

Sečurská poušť vznikla na terciérních sedimentech sečurské a talarské sedimentární pánve, které se od konce svrchního miocénu v důsledku mořské regrese postupně vynořovaly. Terciérní sedimenty původně vyplnily pánevní prostory mezi třemi tektonickými krami masívů Bayovar, Cholan a Paita, které tvoří proterozoické až

mezozické horniny jak sedimentárního, tak krystalického původu. Tyto tektonické kry se staršími formacemi vystupují nad terciární sedimenty až do 480 - 500 m n.m., např. nad městem Bayovarem. V talarské pánvi podloží tvoří eocénní formace, na kterou diskordantně nasedají sedimenty svrchně miocénní formace Miramar. V talarské pánvi chybí spodně a středně miocénní formace nebo jsou erodovány. Je zde zachována pouze svrchně miocénní formace Miramar, která jako nejvyšší a poslední mělkomořská formace pokrývá obě pánve. Po uložení formace Miramar lze předpokládat postupnou regresi moře a kontinentální vývoj této oblasti.



Obr. 14: Snímek zájmového území Landsat 7 ETM+ barevná syntéza 3-2-1

8 PŘEDZPRACOVÁNÍ DAT

Před vlastní analýzou snímků z hlediska přítomnosti silikátů a vápenců v území je nutné data nejdříve připravit. Základní zpracování nazývané předzpracování zahrnuje geometrické a radiometrické korekce.

8.1 Geometrické korekce

Nezpracovaná data obvykle obsahují tak velké polohové chyby, že je nelze použít jako mapy. Pomocí geometrických korekcí se toto zkreslení odstraní a snímek je pak možné vlícovat do mapy. Zdroje chyb jsou změny výšky, polohy a rychlosti nosiče, zakřivení Země a výškové změny reliéfu.

Systematické chyby, které lze předvídat, se odstraňují georeferenčními korekcemi (Halounová, Pavelka 2005). Tato zkreslení jsou předem známa z charakteristik čidla a z charakteristik stavu nosiče. Tyto korekce jsou často provedeny již v přijímací stanici.

Náhodné chyby, které jsou nepředvídatelné, jsou opravovány geometrickými transformacemi pomocí vlíčovacích bodů. Po vybrání dostatečného počtu vlíčovacích bodů se vypočítají transformační koeficienty pro souřadnicové transformační rovnice, které určují vztah mezi geometricky správnou mapou a originálními daty.

Nejčastějším typem transformace je polynomická transformace, která provádí výpočet pomocí souřadnic vlíčovacích bodů. Transformačními funkcemi jsou polynomické rovnice různého počtu řádů. Polynomická transformace 1. řádu je nejrychlejší, ale jedná se maximálně o posunutí, změnu měřítka a rotaci bodů. Polynomy vyšších řádů provádějí mnohem složitější proces přemístění. Po vyjádření transformační funkce dojde k převzorkování. Nejpoužívanější metody převzorkování jsou princip nejbližšího souseda (*Nearest Neighbour*), bilineární interpolace (*Bilinear Interpolation*) a kubická konvoluce (*Cubic Convolution*).

Data ASTER jsou již od pořizovatele georeferencovaná. Pro geometrickou korekci dat ETM+ používá Kopačková (2009) geokódování do souřadnicového systému Universal Transverse Mercator (UTM). Jako referenční snímek slouží digitální model terénu *Shuttle Radar Topographic Mission* (SRTM). Pro transformaci postačuje dvanáct vlíčovacích bodů. Z převzorkovacích metod je zvolena metoda *Nearest Neighbour*.

8.2 Mozaikování

Rozsah snímků ETM+ je přibližně 180 x 180 km², rozsah ASTER je menší 60 x 60 km². Aby bylo pokryto celé zájmové území oblasti Sečurské pouště, bylo nutné zkombinovat více snímků a vytvořit mozaiku.

8.3 Radiometrické korekce

Radiometrická korekce může obsahovat opravy dané kalibrací přístrojů, opravy ze změny ozáření, opravy vyplývající z geometrie letu a opravy ze stavu atmosféry. Opravy dané kalibrací přístrojů byly provedeny již pořizovatelem dat. Z dalších korekcí je podstatná především atmosférická korekce. Zejména pro geologické účely je tento typ radiometrické korekce důležitý. Pro geologické aplikace je důležitá správná hodnota odraženého signálu, která není ovlivněna atmosférou. Vliv atmosféry by mohl zapříčinit vznik absorpčního pásu a díky němu by mohlo dojít k záměně některých minerálů nebo hornin.

Pro odstranění vlivu atmosféry se používá řada způsobů. Základními jsou dva typy:

1. korekce, které používají standardní model atmosféry s ohledem na klimatickou zónu a roční období,
2. korekce s využitím obrazových dat.

Pro předzpracování dat byly zvoleny korekce s využitím obrazových dat. Protože nebyly známy všechny potřebné vstupní parametry pro korekci se standardním modelem atmosféry a bez nich by tato korekce nepřinesla požadované výsledky, pro tuto práci byly zvoleny korekce s využitím obrazových dat. Mezi korekcemi s využitím obrazových je nejvíce známo a používáno následujících pět metod.

1. *Dark object subtraction*

Metoda *dark object subtraction* (DOS) je nejjednodušší z řady atmosférických korekcí. Využívá předpokladu, že tmavé objekty neodráží světlo, tedy že jejich digitální hodnota je nulová. Každá hodnota vyšší než nula musí být výsledkem rozptylu atmosféry. Při použití této metody se hledá v každém pásmu hodnota nejtmašího pixelu a ta se následně odečte od každého pixelu v pásmu.

2. *Flat field calibration*

Flat field calibration (FFC) vytváří relativní odrazivost. Nad vybraným územím je změřeno hlavní spektrum a to je pak přiřazeno každému pixelu ve snímku. Vybraným územím by měl být spektrálně plochý materiál, doporučuje se písčná pláž nebo beton.

3. *Internal Average Relative Reflectance*

Metoda *Internal Average Relative Reflectance* (IARR) je podobná FFC. Také rozděluje referenční spektrum do každého pixelu. V tomto případě ale není referenčním spektrem spektrum vybraného území, ale průměrná hodnota spektra vstupního snímku.

4. *Log residuals (LR)*

Touto metodou se vytváří pseudoodrazivost. Každý pixel je vydělen spektrálním a geometrickým průměrem spektra vstupního snímku.

5. *Empirical line calibration*

Metoda *Empirical line calibration* (ELC) přizpůsobuje spektrum snímku referenčnímu spektru naměřenému v terénu. Tato metoda může dosáhnout nejlepších výsledků, ale vyžaduje poměrně přesné vstupní informace.

Data z tepelné části elektromagnetického spektra nebyla od atmosférických vlivů opravena metodou ELC. Pro atmosférické korekce tepelné části spektra byl použit algoritmus *In-Scene Atmospheric Compensation* (ISAC), který popsal Young, Johnson a Hackwell (2002). Algoritmus určený k úpravě dat s vlnovou délkou od 8 μm do 13 μm . byl aplikován na 6. pásmo ETM+ a 10. – 14. pásmo ASTER.

Algoritmus ISAC

Prvním krokem je určení vlnové délky, která nejčastěji vykazuje maximum jasové teploty a tato vlnová délka je následně použita jako referenční. Pouze spektra, která mají maximum na této vlnové délce, jsou použita pro výpočet atmosférického vyrovnání. Spektra vybraná pro vyrovnání jsou posunuta do úrovně referenčního spektra. Tento posun je pak aplikován na všechny příslušné vlnové délky.

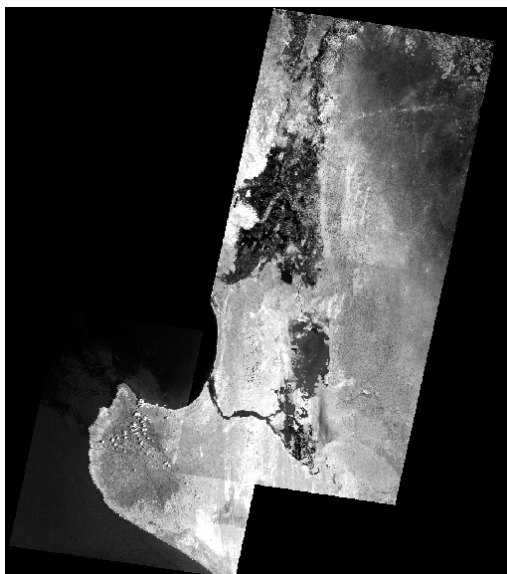
9 VÝSLEDKY

9.1 Předzpracování

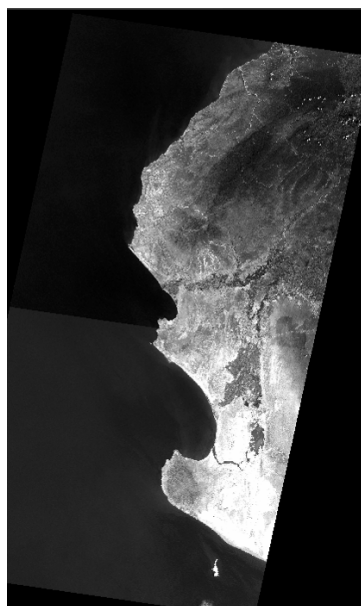
Data byla získána již georeferencovaná a geometricky upravená, proto tato část předzpracování dat nebyla prováděna.

Mozaika ETM+ byla vytvořena ze dvou snímků pořízených přibližně ve stejném období a to z přelomu let 2000 a 2001.

Mozaika ASTER pro potřebnou část území měla být složena ze třech snímků z let 2006 a 2007. Protože snímky byly z odlišných období, nepovedlo se docílit bezešvosti mozaiky. Proto byly vedle této celkové mozaiky vytvořeny jeden bezešvý mozaikový pás, který byly složeny ze scén stejného data pořízení. Třetí snímek, který byl užitečný zejména pro mapování vápenců byl zpracováván zvlášť.



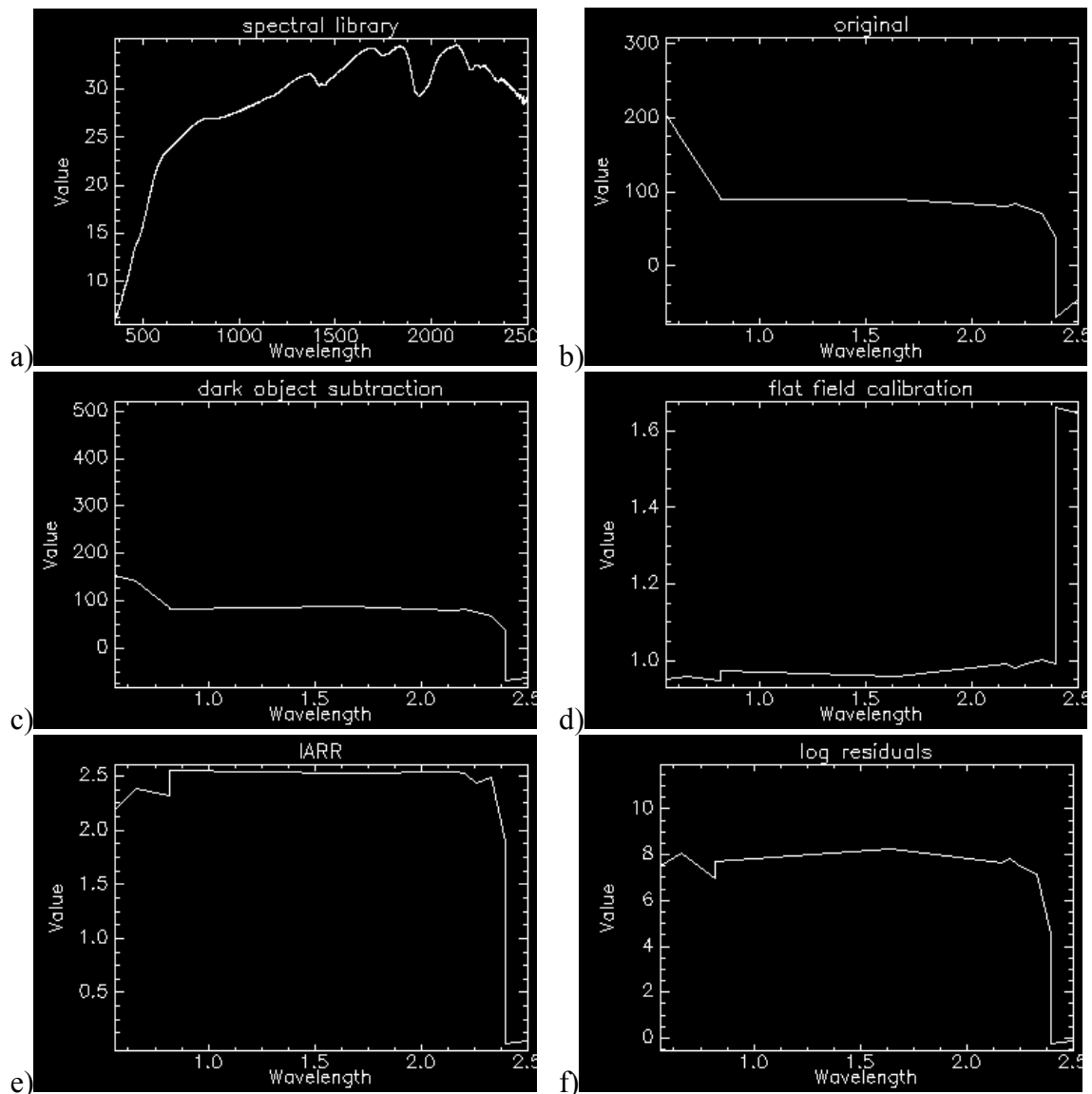
Obr. 15: Mozaika ASTER

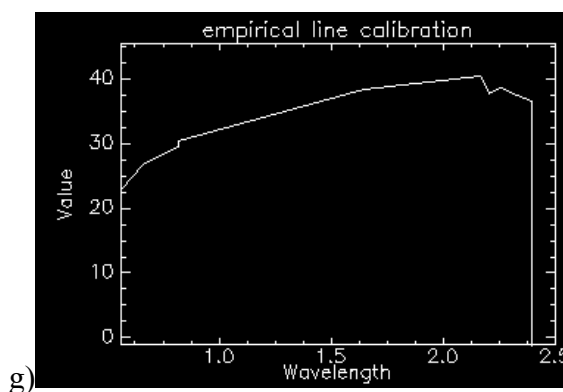


Obr. 16: Mozaika ETM+

Nejvhodnější metoda atmosférické korekce byla vybrána na základě testování jednotlivých metod na testovacím snímku. Na území, jehož spektrální projev byl známý ze spektroradiometrického měření, byly aplikovány metody atmosférické korekce a zjištěn spektrální projev území po korekci. Spektrální křivka bez korekcí (viz obr. 17b) měla úplně opačný tvar než jaký by vybraný povrch měl mít podle spektrální knihovny z terénních měření (viz obr. 17a). Korekce metodou DOS tvar nezměnila, pouze snížila naměřené hodnoty (viz obr. 17c). U metody FFC (viz obr. 15d) jsou naměřené hodnoty

příliš nízké a tvar také neodpovídá. Zbývající metody IARR (viz obr. 17e), LR (viz obr. 17f) i ELC dosáhly přibližně odpovídajícího tvaru. Ale jak u IARR, tak u LR jsou vypočtené hodnoty příliš nízké. Hodnoty po ELC odpovídají hodnotám referenčního spektra. Také ve tvaru křivky stoupající až k vlnové délce 2,1 μm a následný pokles (viz obr. 17g) lze vidět podobnost s křivkou spektrální knihovny. Spektrální křivce ze spektrometrického měření se nejvíce podobala spektrální křivka po aplikaci metody ELC. Tato metoda byla následně použita na všechny snímky, a tím byly odstraněny atmosférické vlivy.



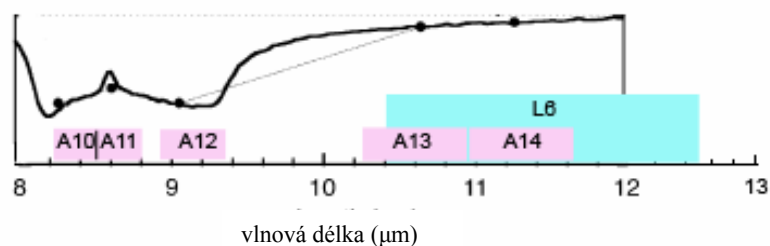


Obr. 17: Porovnání spektrálních křivek: a) spektrální křivka testovacího území získaná ze spektrální knihovny, b) spektrální křivka původního neupraveného snímku, c) po korekci DOS, d) po korekci FFC, e) po korekci IARR, f) po korekci LR, g) po korekci ELC

Po předzpracování dat bylo možné začít s mapováním vybraných minerálních složek. Metody popisované v kapitole 5 byly použity pro jejich mapování a detekci. Protože v kapitole 5, která vycházela z práce s literaturou, byly některé metody zmíněny pouze obecně, bylo nutné tyto metody specifikovat pro vybrané minerální složky – silikáty a vápence, a pro použitá data – ASTER a ETM+.

9.2 Výběr pásem

Základním krokem bylo určit, která spektrální pásma ASTER a ETM+ jsou potřebná pro mapování obsahu silikátů a vápenců v horninách. Proto bylo vytvořeno schéma, které kombinuje charakteristickou spektrální křivku minerálu s rozmístěním spektrálních kanálů. Spektrální křivka (popsána v kapitole 4 a 5). byla vytvořena zakreslením informací z kapitoly 6.

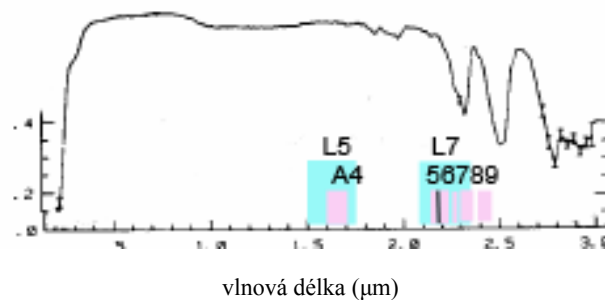


Obr. 18: Spektrální křivka silikátů v porovnání s družicovými daty

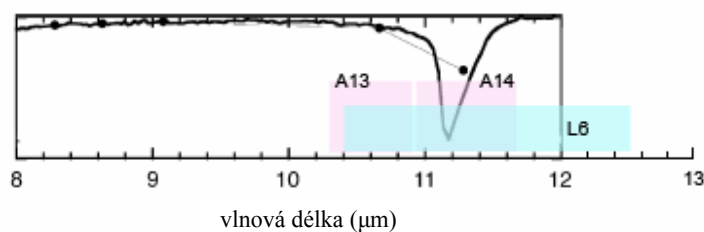
Ze schématu na obr. 18 vyplývá, že pro silikáty, u kterých se absorpční minimum pohybuje v závislosti na vazbě a obsahu SiO_2 od 8 do 11 μm , jsou významná pásma

z tepelné oblasti spektra. Tepelnou oblast spektra znázorňují v případě ASTER pásma 10 – 14 a v případě ETM+ pouze 6. pásmo.

Vápence mají absorpční minima na vlnové délce 2,33 μm (viz obr. 17) a 11,2 μm (viz obr. 20). To odpovídá 6. a 7. pásmu ETM+ a 6. – 9. a 14. pásmu ASTER.



Obr. 19: Spektrální křivka vápenců v VNIR a SWIR v porovnání s družicovými daty



Obr. 20: Spektrální křivka vápenců v TIR v porovnání s družicovými daty

9. 3 Barevná syntéza

Nejjednodušší metoda pro zvýraznění požadovaných prvků byla aplikována několikrát.

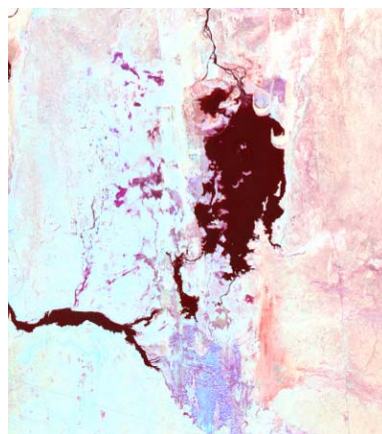
Na datech ASTER byla použita kombinace pásem 13 – 12 – 10 pro nalezení oblastí bohatých na silikáty. Detekované silikáty jsou zobrazeny v jasně růžových barvách (viz obr. 21). Oblasti bohaté na silikáty jsou dobře rozeznatelné od oblastí s jiným minerálním složením.

Pokud by se mělo přesně dodržovat pravidlo pro výběr pásem do barevné syntézy (viz kapitola 5.1), nebylo by možné z dat ETM+ barevnou syntézu vytvořit. Charakteristickou vlastnost silikátů nese jen 6. pásma. Pro barevnou syntézu byla vybrána pásma, která specifickou vlastnost silikátů neobsahují, ale alespoň byla pořízena v infračervené oblasti spektra. Výsledná barevná syntéza byla složena z pásem ETM+ 6, 7 a 5.

Barevná syntéza pásem ASTER 13 – 12 – 10 (viz obr. 21) znázorňuje silikáty v jasně růžových barvách. Oblasti bohaté na silikáty jsou dobře rozeznatelné od oblastí s jiným minerálním složením. Na barevné syntéze 6 – 7 – 5 dat ETM+ (viz obr. 22) jsou silikáty žlutooranžové a také jsou dobře identifikovatelné od ostatních.



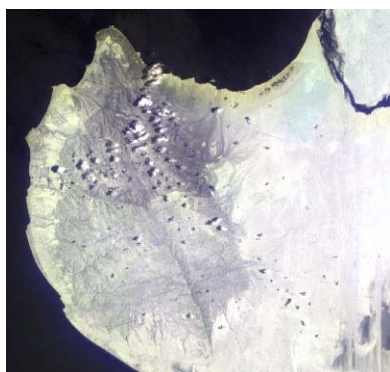
Obr. 21: ASTER barevná syntéza
13-12-10 - identifikace silikátů



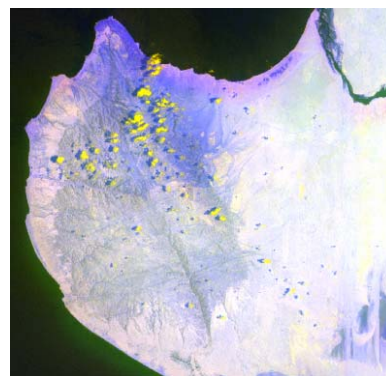
Obr. 22: ETM+ barevná syntéza
6-7-5 - identifikace silikátů

Horniny bohaté na vápník byly hledány pomocí syntéz 8 – 7 – 9 a 8 – 9 – 14 v případě ASTER a 7 – 6 – 5 v případě ETM+. Výběr pásem z dat ETM+ byl stejně jako pro silikáty složitější a omezenější než u dat ASTER.

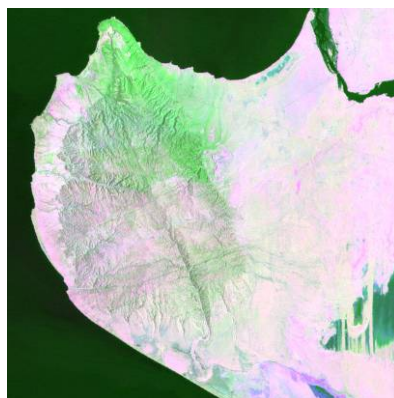
Barevná syntéza dat ASTER 8 – 7 – 9 (viz obr. 23) znázorňuje vápence velmi špatně. Jsou to tmavší oblasti s odstíny žluté. Na kombinaci 8 – 9 – 14 (viz obr. 24) jsou vápence lépe rozpoznatelné. Nachází se v šedé oblasti s odstíny žluté a modré. Horniny s obsahem vápníku získaly růžový odstín při kombinaci pásem 7 – 6 – 5 dat ETM+ (viz obr. 25).



Obr. 23: ASTER barevná syntéza
8-7-9 - identifikace vápenců



Obr. 24: ASTER barevná syntéza 8-9-14 -
identifikace vápenců



Obr. 25: ETM+ barevná syntéza 7-6-5 identifikace vápenců

9. 4 Poměr pásem

Metoda poměru pásem nabízí ještě více variant než barevná syntéza. Nejjednodušší poměr pro silikáty kombinuje minimum a maximum odrazivosti, což je 13. a 10. pásmo ASTER. Na stejném principu vznikl i poměr 12. a 13. pásma. Z tohoto poměru je navíc možné přibližně odhadnout obsah SiO_2 . Poměr 12 / 13 nazývaný *Mafic index* je obsahu SiO_2 nepřímo úměrný. Z dat ETM+ bylo možné vytvořit pouze poměr 5 / 6.

V jednoduchých poměrech, kdy do poměru vstupuje maximální a minimální odrazivost, by se silikáty měly zobrazovat ve světlých odstínech, pokud je maximum v čitateli a naopak v tmavých odstínech pokud je maximum ve jmenovateli. Oblasti se silikáty mají proto po výpočtu poměru 13 / 10 světlejší barvy (viz obr. 26) a naopak po poměru 12 / 13 barvy tmavší (viz obr. 27). Protože poměr 12 / 13 je nepřímo úměrný obsahu SiO_2 , místa v území bohatém na silikáty, která jsou tmavší mají nižší obsah SiO_2 . V obou případech lze oblasti bohaté na silikáty poměrně snadno odlišit od oblastí s jiným horninovým složením. Poměr vytvořený z 5. a 6. pásma ETM+ (viz obr. 28) zobrazuje silikáty stejně jako poměr 13 / 10 ve světlých barvách, ale na rozdíl od tohoto poměru, jsou silikáty hůře odlišitelné.



Obr. 26: ASTER poměr pásem
13/10 - identifikace silikátů

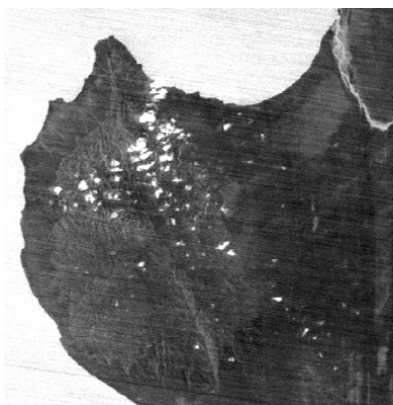


Obr. 27: ASTER poměr pásem 12/13
- identifikace silikátů

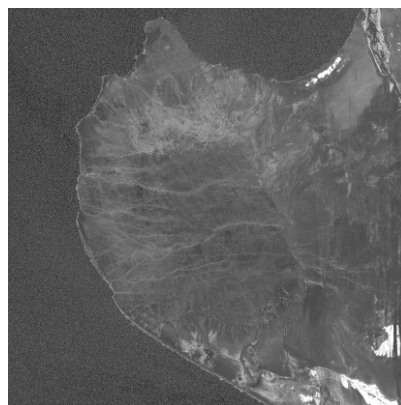


Obr. 28: ETM+ poměr pásem 5/6 – identifikace silikátů

K identifikaci vápenců byl testován poměr 13 / 14 dat ASTER a 5 / 7 dat ETM+. Podíl pásem 13 a 14 ASTER (viz obr. 29) nepřináší nejlepší výsledky. Vápence jsou jen o trochu světlejší než ostatní horniny a moc se od okolí neodlišují. Naopak u podílu vytvořeného z 5. a 7. pásma ETM+ (viz obr. 30) jsou vápence mírně tmavší, ale také ne natolik, aby se jednoznačně daly identifikovat.



Obr. 29: ASTER poměr pásem 13/14
– identifikace vápenců



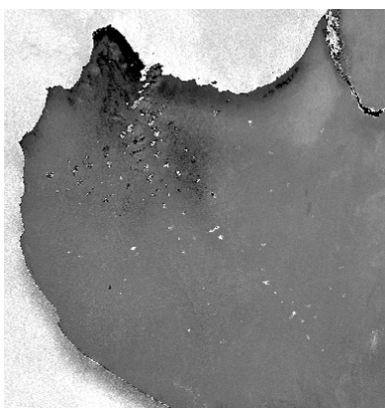
Obr. 30: ETM+ poměr pásem 5/7
– identifikace vápenců

Na rozdíl od postupů pro silikáty, byla pro vápence aplikována literaturou doporučená metoda RBD.

Metoda RBD byla aplikována dvakrát na data ASTER a jednou na data ETM+.

Výsledky kombinace $RBD = \frac{7+9}{8}$ (viz obr. 31) a $RBD = \frac{6+8}{7}$ (viz obr. 32) pro data

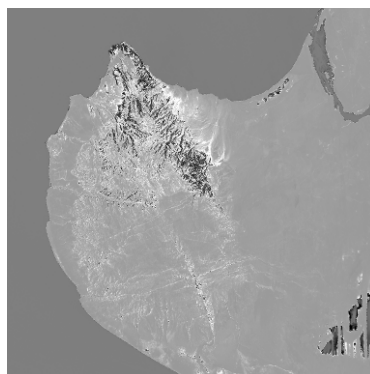
ASTER tak i $RBD = \frac{5+6}{7}$ pro data ETM+ (viz obr. 33) nelze jednoznačně interpretovat. Vápence nelze odlišit od ostatních hornin.



Obr. 31: ASTER metoda RBD
(7+9)/8 – identifikace vápenců



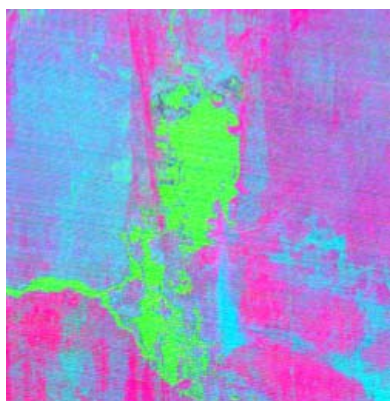
Obr. 32: ASTER metoda RBD (6+8)/7
– identifikace vápenců



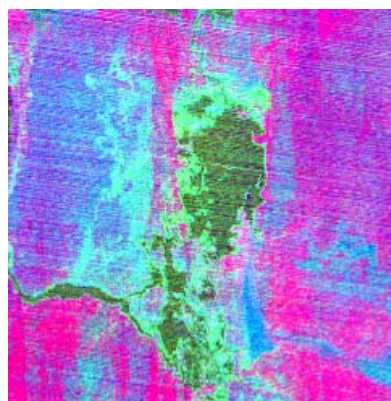
Obr. 33: ETM+ metoda RBD (5+6)/7 – identifikace vápenců

Dále byly z některých poměrů vytvořeny barevné syntézy. Z dat ASTER vznikla syntéza $13 / 10 - 13 / 14 - 12 / 13$ a $13 / 10 - 12 / 11 - 13 / 14$, z dat ETM+ $5 / 7 - 5 / 4 - 3 / 1$.

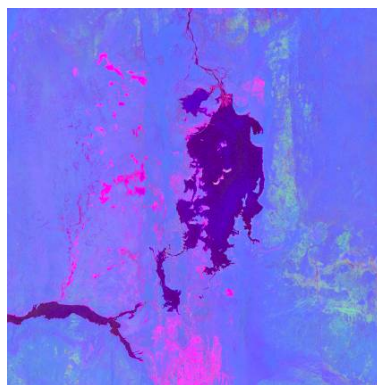
Barevná syntéza poměrů $13 / 10 - 13 / 14 - 12 / 13$ zobrazí horniny bohaté na křemen tmavě růžově (viz obr. 34). Podobně vypadá i barevná syntéza z poměrů $13 / 10 - 12 / 11 - 13 / 14$ (viz obr. 35). Mineralogická kombinace vytvořená z dat ETM+ $5 / 7 - 5 / 4 - 3 / 1$ (viz obr. 36) znázorňuje horniny bohaté na křemen modře. Všechny tři barevné syntézy složené z poměrů pásem umožňují identifikaci hledaných oblastí.



Obr. 34: ASTER barevná syntéza poměrů $13/10-13/14-12/13$ – identifikace silikátů

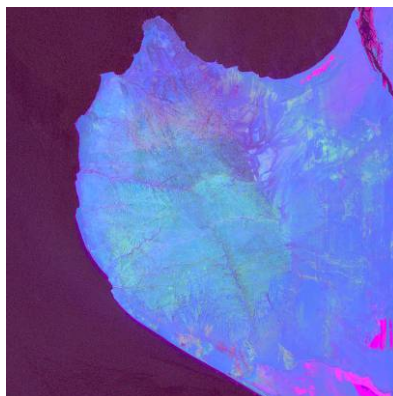


Obr. 35: ASTER barevná syntéza poměrů $13/10-12/11-13/14$ – identifikace silikátů



Obr. 36: ETM+ barevná syntéza poměrů 5/7-5/4-3/1 – identifikace silikátů

Mineralogická kombinace vytvořená z dat ETM+ 5 / 7 – 5 / 4 – 3 / 1 (viz obr. 37) znázorňuje horniny bohaté na vápník zeleně a tyto horniny jsou touto metodou velmi dobře identifikovatelné.



Obr. 37: ETM+ barevná syntéza poměrů 5/7-5/4-3/1 – identifikace vápenců

9. 5 PCA

Analýza hlavních komponent byla na datech ASTER provedena dvakrát. Pro lepší identifikaci silikátů byla vypočtena pouze na datech TIR a pro identifikaci vápenců pouze na datech VNIR a SWIR. Z dat ETM+ byla pro výpočet analýzy hlavních komponent použita všechna pásma.

Výsledkem analýzy hlavních komponent je vedle obrazového výstupu také statistický výstup, který usnadňuje jednoznačnou interpretaci snímku. Tabulka transformačních koeficientů (viz tab. 6) byla vytvořena při provedení analýzy hlavních komponent na TIR pásmech ASTER. Spektrálním projevům silikátů by nejlépe odpovídala komponenta s nízkými hodnotami pásem 10 a 12 a vysokými hodnotami 11, 13 a 14 (viz obr. 18) a tomuto se nejvíce blíží právě 3. komponenta. Na snímku

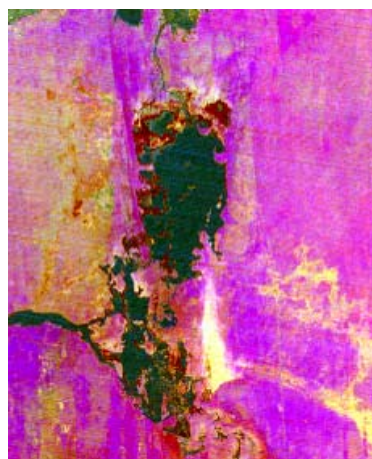
tvořeném PCA3 jsou silikáty světlé (viz obr. 38). Protože ale 3. komponenta obsahuje mnohem méně informací a má horší kvalitu, byla vytvořena ještě barevná syntéza PCA1 – PCA2 – PCA3 (viz obr. 39). Zde jsou silikáty zobrazeny fialovou barvu a výrazně se odlišují od okolí.

Eigenvector	Band 10	Band 11	Band 12	Band 13	Band 14
Band 1	0.701220	0.476302	0.389611	0.276794	0.230251
Band 2	-0.194155	0.364586	0.562902	-0.509404	-0.503020
Band 3	-0.578058	0.662673	-0.141587	0.444631	0.094703
Band 4	0.315464	0.438124	-0.704504	-0.434742	-0.152324
Band 5	-0.192161	0.095519	0.122359	-0.526492	0.813501

Tab. 6: Výsledek PCA ASTER



Obr. 38: ASTER 3. komponenta – identifikace silikátů

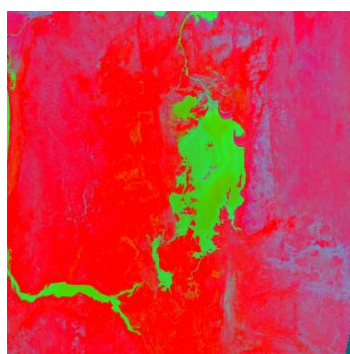


Obr. 39: ASTER barevná syntéza PCA1-PCA2-PCA3 – identifikace silikátů

Podle statistického výstupu analýzy hlavních komponent dat ETM+ spektrálnímu projevu silikátů nejlépe odpovídá 2. komponenta (viz tab 7). Vhodná komponenta pro detekci silikátů z dat ETM+ by měla mít nejvyšší hodnoty v pásmu 6, všechny ostatní hodnoty musí být nižší. Na snímku jsou silikátové oblasti velmi tmavé. Ze stejného důvodu jako v případě dat ASTER byla vytvořena ještě barevná syntéza z prvních třech komponent (viz obr. 40). Na této syntéze jsou silikáty zobrazeny fialově, ale lze je obtížně odlišit od jiných oblastí, které se zobrazily tmavě červeně.

Eigenvector	Band 1	Band 2	Band 3	Band 4	Band 5	Band 7	Band 6
Band 1	0.601	0.390	0.297	0.229	0.204	0.181	0.398
Band 2	0.160	-0.254	-0.389	-0.347	-0.362	-0.314	0.438
Band 3	-0.494	-0.294	-0.190	0.295	0.450	0.329	0.400
Band 4	-0.027	0.043	-0.158	0.815	-0.218	-0.506	-0.039
Band 5	0.567	-0.368	-0.506	0.079	0.409	0.062	-0.307
Band 6	-0.055	-0.088	0.310	-0.207	0.591	-0.700	0.094
Band 7	0.178	-0.741	0.574	0.155	-0.233	0.095	0.022

Tab. 7: Výsledek PCA ETM+

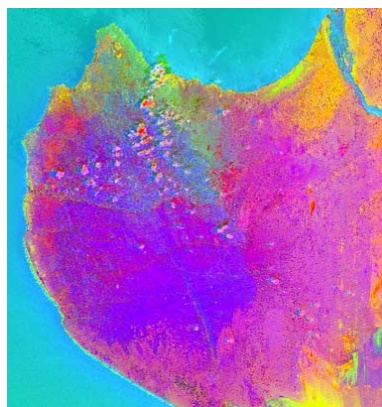


Obr. 40: ETM+ barevná syntéza PCA1-PCA2-PCA3 – identifikace silikátů

Analýza hlavních komponent byla pro vápence na datech ASTER provedena pouze na pásmech VNIR a SWIR. Nejvíce se podobá spektrálnímu projevu vápenců 2. komponenta (viz tab. 8) s nízkými hodnotami v 6. – 9. pásmu (viz obr. 19). Opět byla vytvořena barevná syntéza PCA1 – PCA2 – PCA3 (viz obr. 41). Vápence jsou zobrazeny modro-fialovou barvou.

Eigenvector	Band 6	Band 7	Band 8	Band 9
Band 1	0.299626	0.314702	0.302934	0.420920
Band 2	-0.156355	-0.316685	-0.315329	-0.285792
Band 3	-0.012768	0.028563	-0.006416	0.191765
Band 4	0.423882	-0.413131	-0.324584	-0.265023
Band 5	-0.104084	-0.518858	-0.248071	0.766933
Band 6	0.366310	-0.107538	0.049487	-0.023080
Band 7	-0.120417	-0.093236	-0.056155	0.049976
Band 8	-0.026632	-0.581575	0.777234	-0.097000
Band 9	0.121208	0.033547	-0.178728	0.182105

Tab. 8: Výsledek PCA ASTER

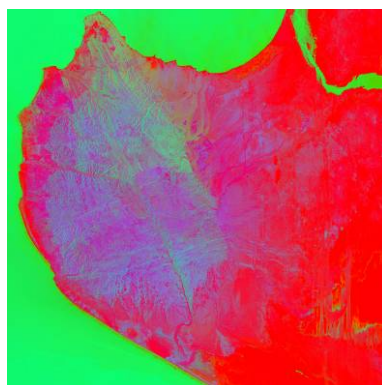


Obr. 41: ASTER barevná syntéza PCA1-PCA2-PCA3 - identifikace vápenců

Po provedení analýzy hlavních komponent na datech ETM+ se vápencům nejvíce podobala 5. komponenta (viz. tab 9). Vhodná komponenta pro detekci vápenců by totiž měla mít nejvyšší hodnoty v pásnu 5, nižší v pásnu 7 a nejnižší v pásnu 6. (viz obr.19, 20). Vápence jsou na barevné syntéze znázorněny fialovou barvou (viz obr. 42) .

Eigenvector	Band 1	Band 2	Band 3	Band 4	Band 5	Band 7	Band 6
Band 1	0.601	0.390	0.297	0.229	0.204	0.181	0.398
Band 2	0.160	-0.254	-0.389	-0.347	-0.362	-0.314	0.438
Band 3	-0.494	-0.294	-0.190	0.295	0.450	0.329	0.400
Band 4	-0.027	0.043	-0.158	0.815	-0.218	-0.506	-0.039
Band 5	0.567	-0.368	-0.506	0.079	0.409	0.062	-0.307
Band 6	-0.055	-0.088	0.310	-0.207	0.591	-0.700	0.094
Band 7	0.178	-0.741	0.574	0.155	-0.233	0.095	0.022

Tab. 9: Výsledek PCA ETM+



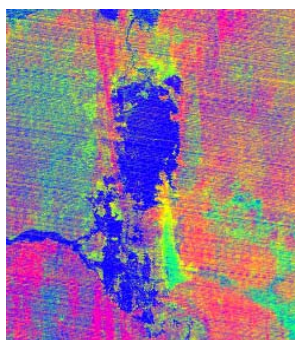
Obr. 42: ETM+ barevná syntéza PCA1-PCA2-PCA3 – identifikace vápenců

9. 6 Dekorelační roztažení

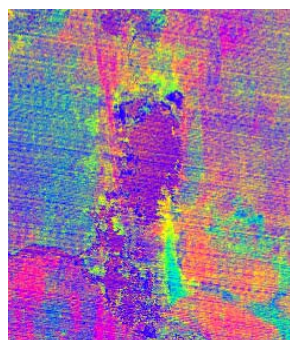
Metoda DCS aplikovaná na data ASTER slouží k identifikaci jak silikátů, tak i vápenců. Podobných výsledků bylo dosaženo zpracováním pásem 14, 12 a 10 i 13, 12 a 10.

Na datech ETM+ byla metoda DCS počítána na kombinaci 6 – 7 – 5 pro silikáty a pro vápence na kombinaci 7 – 6 – 5.

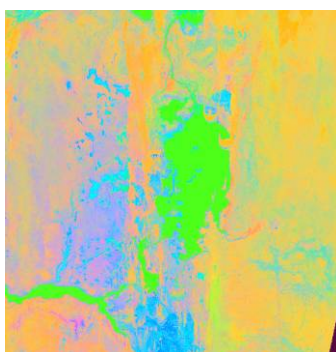
Snímky nelze jednoznačně interpretovat (viz obr. 43, 44) po aplikaci metody dekorelační roztažení na data ASTER. Silikáty mají odstíny červené barvy, ale jejich oblast nelze snadno vymezit. Lepšího výsledku bylo dosaženo dekorelačním roztažením pásem 6 – 7 – 5 dat ETM+ (viz obr. 45).



Obr. 43: ASTER DCS 13-12-10 – identifikace silikátů

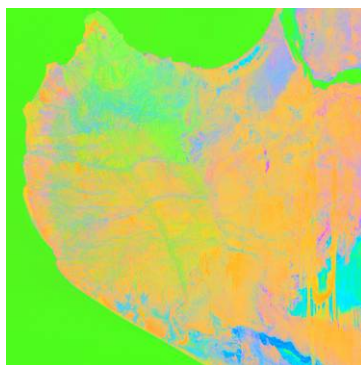


Obr. 44: ASTER DCS 14-12-10 – identifikace silikátů



Obr. 45: ETM+ DCS 6-7-5 – identifikace silikátů

Na snímku dekorelačního roztažení pásem 7, 6 a 5 ETM+ se vápence zobrazily v odstínech světle zelené (viz obr. 46).

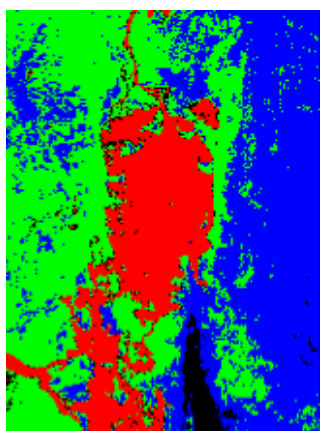


Obr. 46: ETM+ DCS 7-6-5 – identifikace vápenců

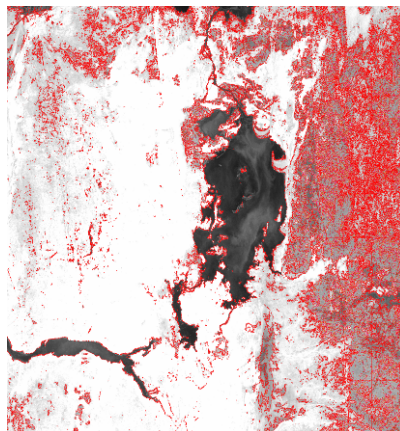
9. 7 Klasifikace

Klasifikace byla na datech ASTER i ETM+ provedena všemi algoritmy popsanými v 5. kapitole – neřízená klasifikace ISODATA a řízené klasifikace SAM a SFF.

Neřízená klasifikace ISODATA poměrně dobře identifikovala na datech ASTER oblast silikátů – na snímku modře (viz obr. 47). Klasifikace dat ETM + dopadla hůře, ale i tak dobře znázorňuje oblast bohatou na silikáty (viz obr. 48).

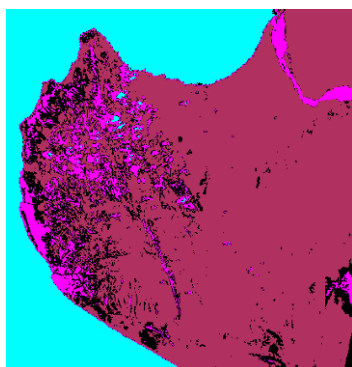


Obr. 47: ASTER klasifikace
ISODATA – identifikace silikátů

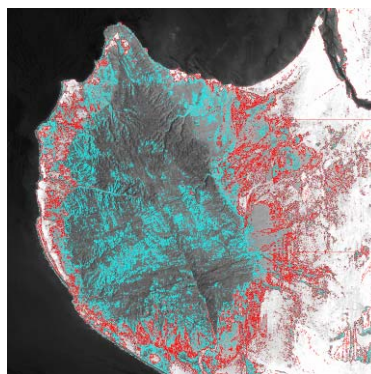


Obr. 48: ETM+ klasifikace ISODATA –
identifikace silikátů

Neřízená klasifikace ISODATA na datech ASTER nedokázala správně odlišit vápencové oblasti (viz obr. 49). Naopak na datech ETM+ ji poměrně dostatečně znázorňuje světle modře (viz obr. 50).

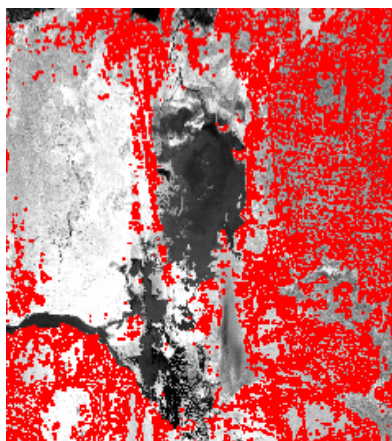


Obr. 49: ASTER klasifikace
ISODATA – identifikace vápenců

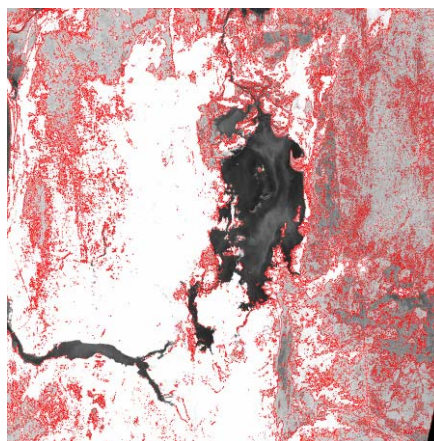


Obr. 50: ETM+ klasifikace ISODATA –
identifikace vápenců

Klasifikace silikátů pomocí algoritmu SAM pro data ASTER vyžadovala prahovou hodnotu 0,0025 rad, u dat ETM+ byla tato hodnota pro dosažení dobrých výsledků zvýšena na 0,15 rad. V obou případech bylo možné oblasti se silikáty zmapovat (viz obr. 51, 52).

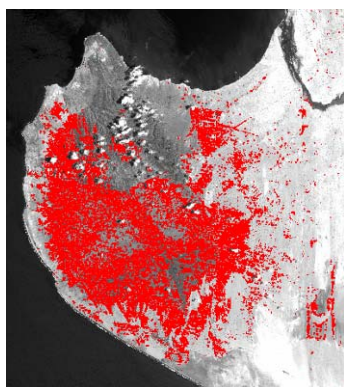


Obr. 51: ASTER klasifikace SAM –
identifikace silikátů

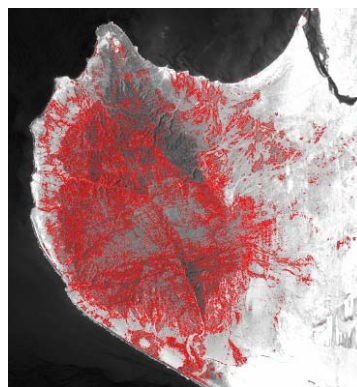


Obr. 52: ETM+ klasifikace SAM – identifikace
silikátů

Algoritmus SAM vyžadoval pro přesný výsledek mapování vápenců pro data ASTER prahovou hodnotu 0,005 rad (viz obr. 53) a pro data ETM+ 0,15 rad (viz obr. 54).

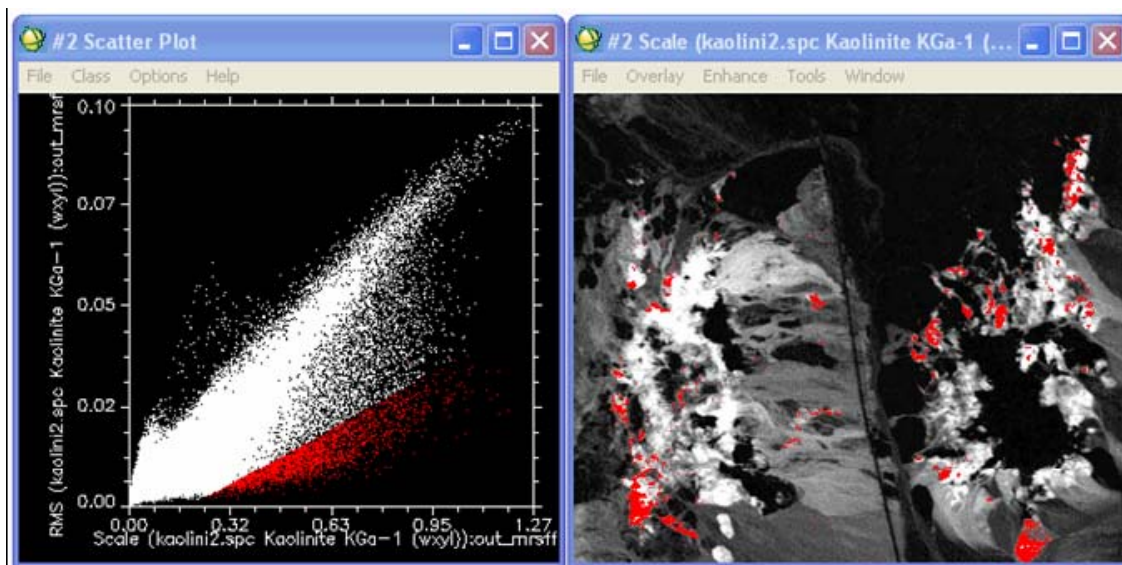


Obr. 53: ASTER klasifikace SAM
– identifikace vápenců



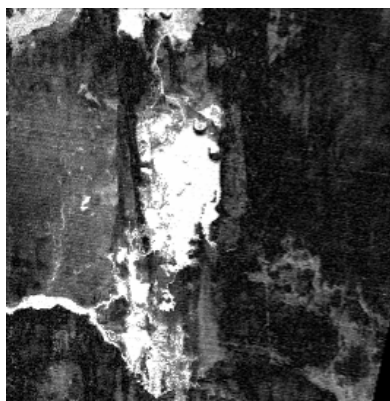
Obr. 54: ETM+ klasifikace SAM
– identifikace vápenců

Výsledkem SFF je jak již byl napsáno výše několik obrazů. Pro lepší interpretaci výsledků byl škálovaný obraz a RMS obraz vyneseno do grafu (viz obr.55). Ve vzniklém rozptylogramu byla vyznačena oblast, která nejlépe vystihovala klasifikovaný jev. Zároveň s vyznačením oblasti v grafu se tato místa znázornila i ve snímku a tím vznikl klasifikovaný obraz.

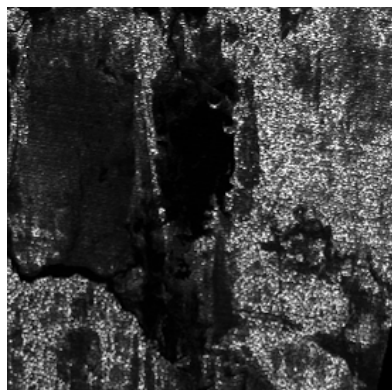


Obr. 55: Zpracování výsledků klasifikace SFF (ENVI Tutorial)

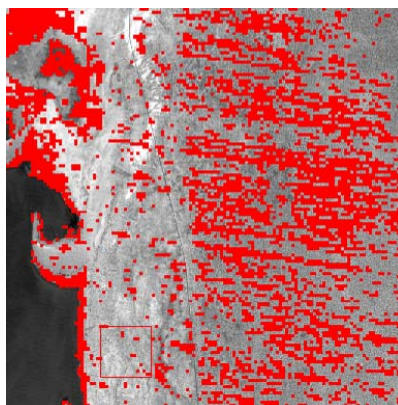
Klasifikace algoritmem SFF přinesla několik výsledků. RMS snímek dat ASTER (viz obr. 56) tmavými odstíny dobře popisuje silikátovou oblast. Podobné území znázorňují světlé oblasti v *Fit* snímku (viz obr. 57), které odpovídají nejlepší podobnosti s referenčním spektrem. Vymezení oblasti v grafu škálovaného a RMS obrazu také dostatečně charakterizuje horniny bohaté na silikáty (viz obr. 58).



Obr. 56: ASTER klasifikace SFF
RMS obraz – identifikace silikátů

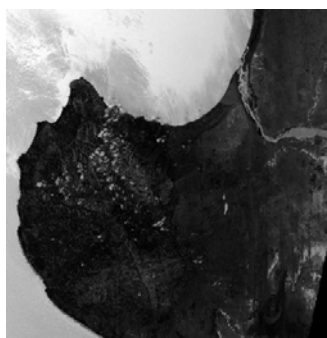


Obr. 57: ASTER klasifikace SFF Fit
obraz – identifikace silikátů

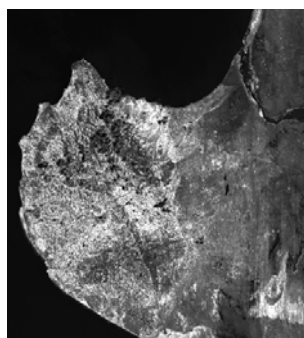


Obr. 58: Klasifikace vymezením oblasti do grafu

Poslední klasifikační metoda SFF nedosáhla pro vápence tak dobrých výsledků jako pro silikáty. RMS obraz (viz obr. 59) z dat ASTER tmavými odstíny zobrazuje skoro celou oblast a vápence tak nelze dobře identifikovat. *Fit* obraz (viz obr. 60), vytvořený z poměru škálovaného obrazu a RMS obrazu, bílými pixely popisuje oblasti, které se nejvíce podobají trénovací množině. Protože z RMS obrazu se nedá mnoho vyčíst, nebyl ani vytvořen graf s vymezenou oblastí, protože by byla zobrazena opět většina území a ne jen oblasti s vápencí.



Obr. 59: ASTER klasifikace SFF
RMS obraz – identifikace vápenců



Obr. 60: ASTER klasifikace SFF Fit obraz –
identifikace vápenců

9.7 Analýza výsledků

Nové snímky, které vznikly různými metodami pro detekci vybraných minerálů, byly následně mezi sebou porovnávány, aby bylo možné určit, které metody jsou vhodnější k použití, a které méně vhodné. Pro posouzení sloužila bodová vrstva terénních měření a přibližná mineralogická mapa oblasti. Bodová vrstva obsahuje informace z laboratorních spektrometrických měření. Jedná se o 18 bodových měření získaných v zájmovém území, ze kterých byla vytvořena spektrální knihovna o rozmezí 0,3 – 2,5 μm . U bodové vrstvy bylo zjišťováno, zda má sledovaný bod projev takový, jak by se měl hledaný minerál projevovat. Dále bylo sledováno, jestli znázorněná oblast výskytu minerálu odpovídá skutečnému výskytu, nebo jestli znázorňuje menší či větší území. Do porovnávání nebyly zahrnuty metody, na jejichž výsledku se nedaly dostatečně identifikovat sledované horniny. Takto byly vyřazeny výsledky vzniklé metodou RBD na datech ASTER i ETM+.

	ASTER		ETM+	
<i>metoda</i>	% shodných bodů	území	% shodných bodů	území
<i>barevná syntéza</i>	80	ano	66	větší
<i>poměr pásem</i>	60, 80	menší	50	větší
<i>kombinace poměrů</i>	85	ano	91	ano
<i>PCA</i>	91	ano	85	ano
<i>DCS</i>	58, 50	menší	66	menší
<i>klasifikace</i>	80, 85, 80	větší	75, 80,-	menší

Tab. 10: Zhodnocení metod pro silikáty

	ASTER		ETM+	
<i>metoda</i>	% shodných bodů	území	% shodných bodů	území
<i>barevná syntéza</i>	66	ano	66	menší
<i>kombinace poměrů</i>	-		95	ano
<i>PCA</i>	90	ano	85	ano
<i>DCS</i>	-		75	větší
<i>klasifikace</i>	-, 91, 66	menší	75, 91,-	ano

Tab. 11: Zhodnocení metod pro vápence

Nejlepších výsledků pro silikáty bylo dosaženo mineralogickou kombinací pásem ETM+. Také analýza hlavních komponent a klasifikace algoritmem SAM dávala velmi dobré výsledky při použití obou druhů dat.

U vápenců se opět nejlepších výsledků dosáhlo mineralogickou kombinací dat ETM+. Dobré výsledky byly také získány analýzou hlavních komponent a to u dat ASTER i ETM+.

10 DISKUSE

10.1 Vhodnost družicových dat

Vhodnost družicových dat byla posuzována zejména v souvislosti s rozmístěním spektrálních pásem a se spektrálními projevy minerálních složek. Výsledky porovnávání dat ASTER a ETM+ ukázaly, že pro mapování jak silikátů tak vápenců jsou vhodnější data ASTER.

Výhodou dat ASTER je vlastní rozmístění a šířka pásem. To je patrné obzvláště v tepelné oblasti elektromagnetického spektra, kde ETM+ snímá v jednom širokém pásmu. ASTER zde snímá v přibližně stejně široké oblasti, některá je rozdělena mezi pět užších pásem. Silikáty se projevují hlavně v této části spektra, je přítomnost vyššího počtu pásem potřebná.

Také pro identifikaci vápenců je široké pásmo ETM+ v TIR nevhodné. Vápence, stejně jako silikáty, mají v TIR svou charakteristickou absorpci. Ta je ale v případě dat ETM+ obsažena ve stejném pásmu jako absorpce silikátů, proto je lze jen obtížně od sebe odlišit.

V oblasti VNIR a SWIR je lokalizace pásem ETM+ lepší a je možné vytvořit několik variant prováděných metod. Přesto pásma ASTER, tím že jsou užší a lépe umístěna, lépe vystihují potřeby k identifikaci vápenců.

I když data ASTER jsou v této práci považována za velmi vhodná pro řešenou problematiku, dala by se najít data vhodnější. Těmi jsou dnes stále více se rozvíjející hyperspektrální data, která snímají v desítkách velmi úzkých pásem. Pro geologické účely jsou často zmiňovány skenery AVIRIS nebo SEBASS.

10.2 Možnosti zpracování

Družicová data byla zpracovávána celou řadou metod (viz kapitola 5). Použitá data byla již georeferencovaná, proto nebylo potřeba provádět geometrické korekce. V literatuře byla nalezena vhodná metoda geometrické korekce a tou je polynomičká transformace s převzorkováním algoritmem *Nearest Neighbour*. Pro sběr vlíčovacích bodů lze využít pro většinu oblastí Země DEM SRTM. Dalším krokem bylo odstranění atmosférických vlivů. Vzhledem ke vstupním datům byly testovány metody atmosférické korekce využívající obrazových dat. Z nich nejlepších výsledků dosáhla

metoda ELC (viz kapitola 8.3, 9.1). Tato metoda může dosahovat poměrně přesných výsledků, ale je závislá na přesnosti referenčních dat na existenci spektrální knihovny. V případě, že spektrální knihovna pro zájmové území není dostupná, je velmi dobrou metodou i kalibrace LR (viz kapitola 8.3, 9.1).

Před vlastním mapováním minerálních složek je potřebné provést výběr zájmových spektrálních pásem, které budou významné pro mapování konkrétní minerální složky. To vychází ze znalosti spektrálních projevů minerálů a hornin a z použitých vstupních dat.

Zvýšení kvality obrazu pro lepší možnost vizuální interpretace dat bylo provedeno metodami barevná syntéza a poměr pásem. Obě metody jsou jednoduché, ale mohou dávat velmi dobré výsledky. Výběr pásem barevné syntézy podle pravidla o umístění pásma s nejcharakterističtějším spektrálním projevem do červené a s méně významným projevem do zelené a do modré je dobré uplatňovat, protože zajistí dobrou identifikaci hledaného jevu. Takto byly vytvořeny barevné syntézy pásem ASTER 13 – 12 – 10 (viz obr. 21) a pásem ETM+ 6 – 7 – 5 (viz obr. 22) pro mapování silikátů. Pro detekci vápenců byly barevné syntézy složeny z pásem 8 – 9 – 14 ASTER (viz obr. 23) a pásem 7 – 6 – 5 ETM+ (viz obr. 24). Obecně platí, že více informací lze vyčíst z barevného snímku než z černobílého. Proto i výsledky poměrů pásem je lepší znázorňovat v podobě barevné syntézy několika vhodně zvolených poměrů. Příkladem může být mineralogický index $5 / 7 - 5 / 4 - 3 / 1$ dat ETM+, který výborný jak k interpretaci silikátů tak i vápenců (viz obr. 36, 37). Na datech ASTER je pro silikáty užitečná barevná syntéza poměrů pásem $13 / 10 - 13 / 14 - 12 / 13$ (viz obr. 34).

Metody transformace obrazu různým způsobem převádějí spektrální pásma pro možnou detekci minerálních složek. V této práci byly použity dvě transformační metody: analýza hlavních komponent a dekorelační roztažení. Analýza hlavních komponent se řadí už mezi složitější metody a je důležité její výsledky, hlavně statistické, správně interpretovat. Přesto se nabízí i jednodušší možnost pro interpretaci výsledků PCA a tou je barevná syntéza z prvních třech komponent (viz obr. 39 – 42). Dekorelační roztažení je metodou podobnou PCA a i její výsledky jsou podobné. Pro účely této práce byly ale výsledky DCS hůře interpretovatelné než výsledky PCA.

Klasifikace dat byla provedena neřízenými i řízenými klasifikačními algoritmy. Za nejspolehlivější metodu, která je používána pro geologické účely, by se dala označit řízená klasifikace algoritmem SAM. Její úspěšnost je ovšem závislá na správném nalezení prahové hodnoty spektrálního úhlu.

Z posouzení vhodnosti použití výše uvedených metod byl navržen metodický postup pro zpracování družicových při řešení úlohy detekce minerálních složek v horninách. Zahrnuje následující kroky:

1. geometrická korekce dat – georeferencování polynomicou transformací a převzorkování metodou *Nearest Neighbour*,
2. atmosférická korekce dat – při existenci vhodné spektrální knihovny korekcí ELC, bez spektrální knihovny korekcí LR,
3. stanovení vhodných pásem pro další zpracování,
4. vytvoření barevné syntézy pravidlem o umístování spektrálních pásem,
5. výpočet významných poměrů pásem a jejich složení do barevné syntézy,
6. transformace obrazu analýzou hlavních komponent,
7. klasifikace algoritmem SAM.

Samozřejmě je možné použít pouze jednu možnost z bodů 4 – 7. Ale protože vybraná metoda nemusí pro konkrétní účely na konkrétních datech poskytovat stoprocentní výsledky, je vždy lepší mapování provést aplikací více metod a ty pak mezi sebou vzájemně porovnat.

11 ZÁVĚR

Cílem diplomové práce bylo provést analýzu metod DPZ, které se používají pro mapování a detekci minerálních složek hornin se zaměřením na určení obsahu křemíkové a vápníkové složky v horninách. Metody byly posuzovány z několika hledisek:

- vhodnost družicových dat,
- možnosti zpracování,
- analýza výsledků.

Pro práci byla použita data ze skenerů Landsat 7 ETM+ a ASTER. Tato data jsou pro geologické účely nejčastěji používána, hlavně proto, že obsahují spektrální pásma z oblasti tepelného infračerveného spektra, kde se významně spektrálně projevuje řada minerálů. Proto lze tato data označit pro řešenou problematiku jako vhodná. Při porovnání obou typů dat a jejich spektrální rozlišení, vyznívá toto srovnání příznivěji pro data ASTER. Počet spektrálních pásem, jejich rozmístění a šířka je lépe uzpůsobena jak pro pouhou interpretaci snímků, tak pro další metody zpracování. Ke zdokonalení výsledků řešené problematiky z hlediska vhodnosti dat by bylo možné vyzkoušet jiné typy dat. Podle spektrálního rozsahu až do oblasti TIR by mohly být použity data skenerů MODIS nebo NOAA, ale jejich prostorové rozlišení (1000 m, resp. 1100) je pro účely geologie naprosto nepoužitelné. Z hyperspektrálních dat by bylo možné použít data AVIRIS pro mapování vápenců a data družice SEBASS pro identifikaci vápenců i silikátů.

Předzpracování dat tvoří důležitou součást práce s daty DPZ. Jeho kvalita může významně ovlivnit dosažené výsledky. Proto byly v práci popsány geometrické a radiometrické korekce a navrženy nejvhodnější metody pro jejich použití.

Metody zpracování obrazu, které byly vybrány, popsány a aplikovány, lze použít pro detekci většiny minerálních složek, pokud je známý spektrální projev horniny a rozmístění pásem družicových dat. Pro silikáty se v literatuře objevuje řada metod konkretizovaných na určitá družicová data. Vápenci se nezabývá tolik autorů jako silikáty a většina metod aplikovaných v této práci byla konkretizována až v průběhu práce.

Metodami použitými pro detekci minerálních složek byly barevná syntéza, poměr pásem, analýza hlavních komponent, dekorelační roztažení, neřízená klasifikace *ISODATA* a klasifikace *Spectral Angle Mapper* a *Spectral Feature Fitting*.

Na základě výsledků různých metod pro předzpracování a zpracování obrazu byl navržen metodický postup. Ten se skládá z následujících kroků:

1. geometrická korekce dat,
2. atmosférická korekce dat
3. stanovení vhodných pásem pro další zpracování,
4. vytvoření barevné syntézy pravidlem o umisťování spektrálních pásem,
5. výpočet významných poměrů pásem a jejich složení do barevné syntézy,
6. transformace obrazu analýzou hlavních komponent,
7. klasifikace.

Metody zpracování obrazu použité pro detekci minerálních složek byly srovnávány z hlediska úspěšnosti identifikace vybrané minerální složky. Dosažené výsledky byly porovnány s laboratorním spektrometrickým měřením získanými v terénu.

Lepších výsledků bylo dosaženo barevnými kombinacemi než černobílými snímky. Také data ASTER většinou dosáhla lepších výsledků než data ETM+. Za nejlepší metody mohou být jednoznačně zvoleny:

- mineralogická kombinace pásem ETM+ 5 / 7 – 5 / 4 – 3 / 1,
- kombinace ASTER 13 / 10 – 13 / 14 – 12 / 13,
- analýza hlavních komponent,
- klasifikace algoritmem SAM.

Přestože na datech ASTER byly získány lepší výsledky, nejsou tyto výsledky dokonalé. Výrazný podíl na tom má skutečnost, že spektrometrická měření z terénu jsou bodová, zatímco prostorové rozlišení dat je 28,5 m resp. 30 m. Také většina hornin je spíše směsí několika minerálů v různém poměru, a proto nelze naprosto přesně identifikovat vybrané minerály. Proto tyto metody neslouží k podrobnému zmapování mineralogie území, ale pouze pro předběžnou představu o území nebo pro mapování v menším měřítku.

Problematika využití DPZ v geologii bude nacházet stále uplatnění při geologickém mapování. Její další rozvoj bude spojen s větším využíváním hyperspektrálních dat. Široké možnosti interpretace a zpracování hyperspektrálních dat naleznou využití právě i v detekci minerálních složek. Ačkoliv mapování pomocí DPZ předchází vlastnímu geologickému výzkumu a výsledky získané metodami DPZ je lepší ověřovat bv terénu, přesto je tato metoda velmi užitečná, často usnadní práci před terénním průzkumem a její role je nezanedbatelná i v složitějších geologických analýzách.

POUŽITÁ LITERATURA

ABRAMS, M., HOOK, S. (2006): *Imaging Spectrometry in the Thermal Infrared*. In: Imaging Spectrometry

ABRAMS, M. J., HOOK, S., RAMCHANDRAN, B. (2002): *ASTER user handbook - Version 2*.

[http://asterweb.jpl.nasa.gov/content/03_data/04_Documents/aster_user_guide_v2.pdf]

CLARK, R. N. (1995): *Reflectance Spectra*. In: Rock Physics and Phase Relations. American Geophysical Union [http://www.agu.org/reference/rock/14_clark.pdf]

CLARK, R. N., SWAYZE, G. A. (1998): *Mapping Minerals, Amorphous Materials, Environmental Materials, Vegetation, Water, Ice and Snow, and Other Materials: The USGS Tricorder Algorithm* [<http://speclab.cr.usgs.gov>]

DOBROVOLNÝ, P. (1998): *Dálkový průzkum Země. Digitální zpracování obrazu*. Brno, PřF MU. 201 str.

DRURY, S. (2001): *Image Interpretation in Geology*. 3rd edition, Nelson Thornes Ltd, Cheltenham, 290 str.

GAFFEY, S. J. (1986): *Spectral reflectance of-carbonate minerals in the visible and near infrared (0.35-2.55 microns): calcite, aragonite, and dolomite*. American Mineralogist (71), STR. 151-162

HALOUNOVÁ, L., PAVELKA, K. (2005): *Dálkový průzkum Země*. České vysoké učení technické, Praha, 191 str.

HEWSON, R. D., CUDAHY, T. J. (2005): *Seamless geological map generation using ASTER in the Broken Hill-Curnamona province of Australia*. Remote Sensing of Environment 99, str.159 – 172

KATRA, I., LANCASTER, N. (2008): *Surface-sediment dynamics in a dust source from spaceborne multispectral thermal infrared data*. Remote Sensing of Environment 112, str. 3212–3221

KOLÁŘ, J. (1982): *Metoda multispektrálního snímání (MSS) v dálkovém průzkumu Země*. České vysoké učení technické v Praze, Praha, 106 str.

KOPAČKOVÁ, V., RAJCHL, M. (2009): *Detection of ENSO – Induced Changes Based on Analyses of Multitemporal Earth Observation Data: A Study from NW*, nepublikováno

LACH, S. R., KEREKES, J. P.: *Atmospheric Compensation Using a Geometrically Compensated Empirical Line Method*
[http://www.cis.rit.edu/people/faculty/kerekes/pdfs/IGARSS_2008_Lach_GCELM.pdf]

MARTÍNEK, K., KOPAČKOVÁ, V. (2007): *GIS a DPZ v geologických vědách v prostředí ArcGIS a jeho extenzí*. Česká kosmická kancelář, Praha. 158 str.

van der MEER, F. D., de JONG, S. M. (2006): *Imaging Spectrometry*. Springer, Dordrecht, str. 373

van der MEER, F. D., de JONG, S. M. (2006): *Imaging Spectrometry: Basic Analytical Techniques*. In: Imaging Spectrometry

van der MEER, F. D., YANG, H. (2006): *Imaging Spectrometry and Geological Application*. In: Imaging Spectrometry

METELKA, V. (2005): *Geological Analysis of Remote Sensing Data in the Gobi Altai Region*, diplomová práce, 88 str.

NINOMIYA, Y. FU, B., CUDAHY, T. J. (2005): *Detecting lithology with Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) multispectral thermal infrared “radiance-at-sensor” data*. Remote Sensing of Environment 99, str. 127 – 139

ROWAN, L. C., MARS, J. C. (2003): *Lithologic mapping in the Mountain Pass, California area using Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) data*. Remote Sensing of Environment 84, str. 350–366

STEFANOV, V. L. (2005) *Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection (ASTER) data and band combinations*
[<http://agassiz.la.asu.edu/docs/aster-white-paper.html>]

VAUGHAN, R. G., WENDY, M. C., TARANIK, J. V. (2003): *SEBASS hyperspectral thermal infrared data: surface emissivity measurement and mineral mapping*. Remote Sensing of Environment 85 , str. 48–63

YOUNG, S. J., JOHNSON, B. R., HACKWELL, J. A (2002): *An in-scene method for atmospheric compensation of thermal hyperspectral data*, J. Geophys. Res.